

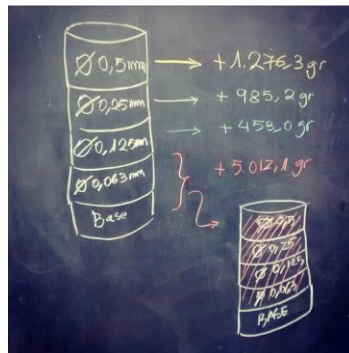


Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE LA EDIFICACIÓN

### PROYECTO FINAL DE MÁSTER



## PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN PROBETAS DE TIERRA

### EN LABORATORIO

**PROYECTISTA:** BELÉN GONZÁLEZ SÁNCHEZ

**DIRECTORES:** JOAN RAMON ROSELL AMIGÓ I ANTÒNIA NAVARRO EZQUERRA

**CONVOCATORIA:** SEPTIEMBRE 2016



## RESUMEN

---



El Proyecto Final de Máster que se presenta a continuación está orientado en el ámbito del conocimiento experimental de la tierra como material de construcción.

La tradición constructiva en la Península Ibérica ha sido básicamente en tierra aunque en el último siglo se ha abandonado progresivamente su uso, ya que se tiene la creencia de que ésta es sinónimo de pobreza y de bajo estatus social. Sin embargo, existe un amplio patrimonio construido que requiere de los avances en investigación para su conservación, rehabilitación y la recuperación de su uso en obra nueva.

Actualmente existen investigaciones que buscan mejorar las propiedades de la tierra a partir del estudio de la granulometría, la plasticidad, la compactación óptima, el grado de cohesión de las partículas, la utilización de aditivos, la retracción durante el secado, la durabilidad, la resistencia, etcétera. Sin embargo debido a la falta de normativa específica para este material normalmente se utiliza como referente la norma de control de hormigón fresco, aunque su comportamiento nada tenga que ver con la tierra.

Una de las propiedades de la tierra es su higroscopicidad, pero las investigaciones publicadas no ofrecen valores sobre las condiciones ambientales a las que se someten las muestras, se desconoce la humedad relativa a las que están sometidos los especímenes durante el tiempo de "curado", lo que dificulta la comparación entre estudios existentes.

En este Proyecto Final de Máster se presentan los resultados de la experimentación con probetas de tierra, fabricadas con el mismo porcentaje de agua inicial, estabilizadas higroscópicamente a diferentes humedades relativas ambientales para conocer cómo influye este parámetro en la resistencia a compresión de las mismas. A demás, también se valorar la influencia del agua de cal, respecto a la fabricación de probetas con sólo agua, en relación a la humedad relativa ambiental de las muestras y su resistencia a compresión.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>PÁGINA 7</b>	5.5. Tiempo de estabilidad higroscópica de las muestras	Página 37
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>PÁGINA 11</b>	5.6. Densidad inicial y final de las muestras	Página 38
<b>3. OBJETIVO Y PLAN DE ENSAYOS</b>	<b>PÁGINA 19</b>	5.7. Módulo de elasticidad dinámico (MOE)	Página 38
<b>4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>PÁGINA 25</b>	5.8. Resistencia a compresión de las muestras	Página 39
4.1. Análisis granulométrico de suelos por tamizado	Página 28	5.9. Humedad real, inicial y final de las muestras	Página 39
4.2. Determinación del límite líquido de un suelo	Página 29	<b>6. FASE EXPERIMENTAL. SEGUNDA PARTE</b>	<b>PÁGINA 41</b>
4.3. Determinación del límite plástico de un suelo	Página 29	6.1. Fabricación de las probetas	Página 43
4.4. Determinación del índice de plasticidad	Página 30	6.2. Muestras a diferentes humedades ambientales	Página 43
4.5. Determinación del contenido de sales solubles	Página 30	6.3. Tiempo de estabilidad higroscópica de las muestras	Página 44
4.6. Determinación del contenido de materia orgánica	Página 31	6.4. Densidad inicial y final de las muestras	Página 44
4.7. Composición de las arcillas por Difracción de Rayos X	Página 31	6.5. Módulo de elasticidad dinámico (MOE)	Página 44
4.8. Interpretación de los resultados	Página 32	6.6. Resistencia a compresión de las muestras	Página 45
<b>5. FASE EXPERIMENTAL. PRIMERA PARTE</b>	<b>PÁGINA 33</b>	6.7. Humedad real, inicial y final de las muestras	Página 45
5.1. Determinación de la humedad óptima de un suelo	Página 35	<b>7. RESULTADOS</b>	<b>PÁGINA 47</b>
5.2. Composición de la curva granulométrica	Página 36	7.1. Resultados primera fase experimental	Página 49
5.3. Fabricación de las probetas	Página 36	7.2. Resultados segunda fase experimental	Página 55
5.4. Muestras a diferentes humedades ambientales	Página 37	7.3. Resultados comparativos	Página 60

**8. CONCLUSIONES**

**PÁGINA 63**

**9. PROPUESTAS DE FUTURO**

**PÁGINA 67**

**10. BIBLIOGRAFÍA**

**PÁGINA 71**

**11. AGRADECIMIENTOS**

**PÁGINA 79**



## 1. INTRODUCCIÓN

---



El Proyecto Final de Máster que se presenta a continuación está orientado en el ámbito del conocimiento experimental de la tierra como material de construcción.

Todos somos conscientes de que la tierra es uno de los materiales de construcción presentes desde la cuna de la civilización hasta nuestros días. Según fuentes del *Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)* el 50% de la población mundial viven actualmente en construcciones realizadas con tierra y el 15% de las obras arquitectónicas que la UNESCO recoge en su catálogo de *Patrimonio Mundial* también están construidas con éste material (1).

Sin embargo, se tiene la creencia que la tierra es sinónimo de pobreza y está en desuso, debido básicamente a su rechazo social, aunque desde mediados del siglo XX se está intentando volver a poner en valor. Actualmente existe un movimiento a nivel internacional que reivindica el uso de este material tanto desde la visión de la conservación y restauración del patrimonio existente, como desde la innovación aplicable a la construcción presente y futura.

Uno de los inconvenientes del uso de la tierra es su heterogeneidad, lo que ha supuesto un hándicap frente a otros materiales de construcción surgidos a partir de la industrialización, contribuyendo al abandono paulatino de éste como material de construcción. Así pues, podemos tomar como ejemplo el caso de la Península Ibérica donde la construcción con tierra dibujaba el paisaje rural y urbano hasta que en pleno siglo XIX se relegó a edificaciones rurales. A principios del siglo XX empezó a sustituirse por la fábrica de ladrillo cocido y casi desapareció finalmente con el uso del hormigón armado (2).

Es comprensible que el sector de la construcción haya apostado por materiales homogéneos, ya que son más sencillos de adaptar a los procesos de industrialización tecnológica, pero por definición un material heterogéneo es simplemente un elemento que presenta diferentes prestaciones según la proporción que se tome de él.



Figura 1.1. Construcciones de tierra en Europa, Asia, África y Oceanía. Fuente: CRAterre (3).



Figura 1.2. Construcciones de tierra en América. Fuente: CRAterre (3).

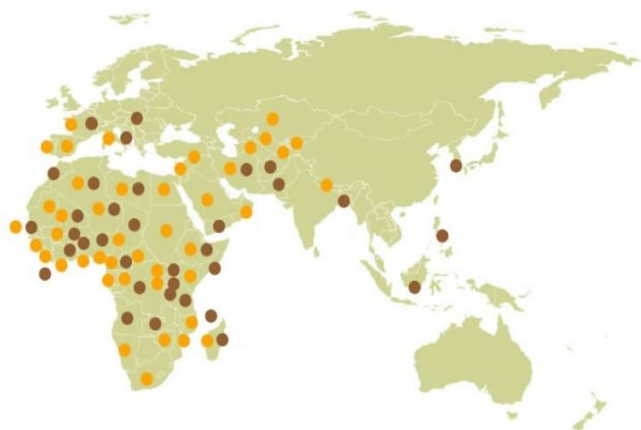


Figura 1.3. Construcciones de tierra en Europa, Asia, África y Oceanía. Fuente: CRAterre (3).



Figura 1.4. Construcciones de tierra en América. Fuente: CRAterre (3).

Por lo tanto la utilización de la tierra, que se caracteriza por ser un material heterogéneo, implica realizar un estudio previo detallado de su composición en gravas, arenas, limos y arcillas, que son características del lugar de explotación, para poder determinar sus particularidades y reflexionar sobre el uso final del material, la modificación de la composición inicial o la incorporación de aditivos (4) (5) (6).

Actualmente la tierra todavía no es un material industrializado (7), aunque estudios muy recientes han realizado grandes avances en este sentido (8), por lo que tenemos mucho recorrido, a nivel de investigación, para conocer y mejorar sus propiedades.

En este sentido, existen manuales e investigaciones que buscan mejorar las propiedades de la tierra a partir del estudio de la granulometría, la plasticidad, la compactación óptima, el grado de cohesión de las partículas, la utilización de aditivos, la retracción durante el secado, la durabilidad, la resistencia y la transmitancia del elemento construido (5) (9).

Este Proyecto Final de Máster tiene como finalidad determinar cómo y cuándo podemos obtener valores fiables de resistencia a compresión simple de un elemento de tierra, a partir de un estudio experimental que relacione la humedad relativa ambiental del lugar donde se almacenan las probetas, desde su confección hasta el momento que son ensayadas, y su resistencia a compresión.

## 2. ANTECEDENTES

---



Existe mucha literatura sobre la tierra como material de construcción, desde autores tan importantes como Hugo Houben, Humbert Guillaud o Gernot Minke que han publicado textos imprescindibles para la divulgación y el desarrollo del material tierra (5) (9); hasta investigaciones muy modestas, como son algunos Proyectos Finales de Grado y/o Máster dirigidos desde diferentes departamentos de la propia Universitat Politècnica de Catalunya (10) (11) (12) (13); sin olvidar a un colectivo tan importante como es CRAterre (3), y sus grupos de trabajo vinculados como por ejemplo Amàco, que se ha convertido en una referencia mundial en el campo de la arquitectura de tierra.

La mayor parte de los autores consideran que es necesario hacer una breve retrospectiva para hacernos una idea global de lo que ha supuesto la construcción con tierra cruda antes de poder plantear un ahora y un futuro para éste material. Existen magníficos textos muy recomendables, como son *Traité de construction en terre* de Hugo Houben, Hubert Guillaud, Michel Dayre y Pierre-Yves Bard y Guy Perrier (5); *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas* de Camila Mileto y Fernando Vegas (2); *Arquitectura de tapia* de Fermín Font y Pere Hidalgo (14); *Casas hechas a mano y otros edificios tradicionales* de John May (15); o *Arquitectura y construcción con tierra. Tradición e innovación* de Luís Maldonado, David Rivera y Fernando Vela (7); donde se pone de manifiesto la gran cantidad de patrimonio existente alrededor del mundo, muchas veces desconocido, realizado con éste material.

Para éste proyecto se ha considerado interesante reflexionar sobre alguna de las opiniones e investigaciones de diferentes autores para obtener una visión más amplia del tema antes de desarrollar la parte experimental del trabajo.



Fotografía 2.1. Ksar de Ait Ben Hadu (Marruecos), Patrimonio Mundial UNESCO. Fuente: UNESCO/Mario Santana (16).



Fotografía 2.2. Zona arqueológica de Paquimé (México), Patrimonio Mundial UNESCO. Fuente: Periódico El Sol de México (17).





Fotografía 2.3. Centro Contemplativo Windhover, equipamiento público cultural realizado en tapia (Palo Alto, California, USA). Fuente: Terra Awards (26).



Fotografía 2.4. La Gran Muralla de Australia Occidental, vivienda colectiva realizada en tapia (Pilbara, Australia). Fuente: Terra Awards (26).

Según el catedrático Luís Maldonado y del profesor David Rivera *"La tierra sólo puede prosperar como material moderno habitual en la construcción si conseguimos incorporarla al contexto de la era postindustrial para aprovechar las ventajas que ha aportado siempre a la edificación (bajo coste, carácter reciclable, cualidades higrotérmicas, ahorro energético, carácter no contaminante, etc.)"* (7). A pesar que este texto fue editado en el año 2002 su reflexión sigue muy vigente, exponiendo claramente cuál es el camino a seguir de todos los actores interesados en el resurgir de la construcción con tierra, especialmente de los dedicados a la investigación, desarrollo e innovación del material.

Uno de los grandes impulsores del creciente interés de la tierra como material de construcción es la "construcción sostenible", que ha redescubierto las ventajas de éste material para edificar construcciones respetuosas con el medio ambiente y con sus usuarios, sostenibles, con una demanda energética responsable pero cubriendo las necesidades actuales de confort, a precio muy competitivo.

A raíz del empuje de la construcción sostenible se han escrito muchos textos y artículos que reflexionan sobre la necesidad de incorporar los beneficios de la construcción con tierra a las construcciones de obra nueva. Como por ejemplo, los artículos referentes a la construcción y explotación de la "Vivienda Vernacular del Siglo XXI" finalista de Terra Awards, en la modalidad de vivienda individual del Primer Premio Mundial de Arquitectura Contemporánea en Tierra Cruda, del año 2016 (18) (19), pero existen muchos otros ejemplos tanto dentro como fuera de nuestra fronteras (20). En ocasiones los estudios también realizan comparaciones entre dos edificaciones reales similares de tierra donde se modifican factores generacionales (21), factores climáticos (22), aportación de mejoras respecto a un modelo inicial (23) (24) o comparando una edificación de tierra con una construcción más actual. A demás de todas las investigaciones centradas en mejorar, a través de la incorporación de aditivos, las propiedades térmicas del sistema constructivo (13) (25).



Todos estos autores intentan transmitir a través de sus investigaciones, a pesar del gran abanico de posibilidades que engloba la construcción sostenible, que es una realidad construir con tierra en obra nueva en un contexto postindustrial y que es necesario seguir investigando en el campo de la rehabilitación energética de edificaciones existentes con tierra aportando soluciones más sencillas, concretas y eficaces para llegar a cumplir con los estándares normativos actuales de confort y eficiencia energética.

A pesar de los beneficios que plantean los defensores de la recuperación y utilización de la tierra en sus múltiples formas de aplicación, existen tres grandes argumentos que suscitan dudas e inquietudes en el resto de profesionales del sector: el **agua**, el **sismo** y la **resistencia del material**.

El **agua** es un elemento a tener en cuenta durante toda la vida del elemento de tierra, desde su diseño y ejecución hasta el final de su vida útil. Es evidente que los elementos contruidos con tierra no estabilizada son permeables, por lo que es necesario que se protejan eficazmente contra la acción de la lluvia, en concreto de las escorrentías de agua, y de las heladas cuando el elemento está en estado húmedo. Las protecciones más comunes consisten en la colocación de aleros, barreras impermeabilizantes, elevaciones sobre la cota del terreno, etc. (*Fotografías 2.5. y 2.6.*). Aunque también se pueden realizar por ejemplo tratamientos específicos superficiales en las zonas de riesgo y, por supuesto, estabilizar o incorporar aditivos en la mezcla de tierra inicial durante la fase de ejecución (4) (12).

A pesar de que inicialmente los conceptos "actividad sísmica" y "construcción con tierra" parecen antagónicos, existen ejemplos de edificaciones tradicionales contruidas con tierra que sobreviven y se están desarrollando estrategias destinadas a garantizar la estabilidad de edificios de tierra al sismo (27) (28) (29).



Fotografía 2.5. Protecciones frente al agua tradicionales. Casa contruida en tapia en Bercianos del Real Camino León (España).  
Fuente: [www.joseluisluna.com](http://www.joseluisluna.com) (30).



Fotografía 2.6. Pastilla de tierra con tratamiento hidrofóbico.  
Fuente: Amàco (3).



Fotografía 2.7. Colocación de malla electrosoldada en edificación de adobe como medida antisísmica. Fuente: Surtierra (35).



Fotografía 2.8. Casa Munita Gonzalez, vivienda individual de tapia y estructura metálica (Batuco, Chile). Fuente: Terra Awards (35).

Como comenta el profesor Marcial Blondet<sup>1</sup>, en Perú el 40% de los edificios residenciales son de tierra y la mayor parte de las víctimas por terremoto fallecen por aplastamiento de su propia vivienda, por lo que es necesario llevar a cabo estudios orientados a impedir el colapso de los muros de éste tipo de edificaciones durante un episodio de sismo.

Existen estudios de arquitectura e ingeniería que ya están utilizando sistemas diseñados para impedir el colapso de las estructuras de tierra frente a sismo, tanto en edificación de obra nueva como en edificios existentes reforzados antes y después de un sismo (*Fotografías 2.7. y 2.8.*).

Desde el ámbito constructivo, una de las dudas que surgen sobre las construcciones realizadas con tierra es su resistencia. La carga repartida máxima que puede soportar un elemento fabricado con tierra utilizando la técnica del tapial oscila entre 0,62 MPa y 5,3 MPa (31), en función de la técnica constructiva utilizada, las características propias del material, las mejoras realizadas a partir de la incorporación de estabilizantes o aditivos, el método de preparación y de compactación. Estos valores de resistencia a compresión nos pueden parecer insuficientes, en cuanto a valor absoluto, y poco fiables, dada la dispersión de valores sobre todo porque nuestro valor de referencia actual es el hormigón armado que está bien tipificado y con un valor de resistencia a compresión característico.

Sin embargo, existen construcciones de tapia que se han mantenido prácticamente inalterables con el paso de los siglos, demostrando su resistencia y durabilidad más allá de lo esperado (32). Ciertamente, la mayoría de ejemplos son anecdóticos y es necesario conocer la resistencia a compresión de cada uno de los elementos de tierra con función estructural, tanto en rehabilitación como para el cálculo de nuevas estructuras (33) (34).

---

<sup>1</sup>. Profesor del Departamento de Ingeniería de la Universidad Pontificia Católica del Perú, en su conferencia "A preliminary proposal for a procedure to design a rope mesh reinforcement system for adobe buildings located in seismic areas", impartida el día 13 de Julio de 2016 en el *XII Congrès mondial sur les architectures de terre*.

Actualmente y como consecuencia de la falta y/o limitación de las normativas actuales para diseñar y evaluar elementos contruidos en tierra (13), es necesario acudir a la normativa para construcciones de fábrica o a la normativa de hormigón armado (36).

Si estamos analizando las propiedades mecánicas de bloques de tierra comprimida (BTC) o adobes (37) (38), existe regulación por parte de la UNE 41410:2008 *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. En cambio cuando las investigaciones se centran en el estudio de otras soluciones constructivas con tierra, como puede ser la técnica del tapial, los investigadores optan mayoritariamente por aplicar la metodología para el ensayo de probetas de hormigón fresco, independientemente de la técnica de estabilización o aditivado utilizada para mejorar las prestaciones iniciales del elemento. En este sentido, lo más habitual es comparar los tiempos de curado y el aumento de resistencia de una probeta de tierra a 7, 14 y/o 28 días (39) (40).



Fotografía 2.9. Torres en Aseer (Aseer, Arabia Saudita). Estas construcciones tienen pocos huecos, únicamente como puestos de vigilancia, y se realizan colocando hileras de piedras, a modo de voladizo y como línea de defensa frente a un posible ataque, para frenar la erosión de los muros de tierra en cada capa. En la zona donde se encuentran estas torres hay una oscilación térmica extrema entre el día y la noche, y las mayores precipitaciones registradas del país. Fuente: tectonicablog.com (41).



### **3. OBJETIVO Y PLAN DE ENSAYOS**

---





En los últimos años, una pregunta recurrente que se ha planteado dentro de los grupos de investigación GICITED y GREa es *"¿Cuál es el tiempo de "curado" de una probeta determinada de tierra?"*. La duda surge a raíz de la búsqueda bibliográfica, la asistencia a congresos y de la propia experimentación en laboratorio, y en ningún caso es un planteamiento nuevo ya que todo investigador tiene que resolverlo para poder desarrollar su campaña experimental basada en este material.

Tal y como se ha explicado anteriormente, los autores consultados buscan en normativas existentes la respuesta a la pregunta anterior. Debido a la falta de normativa específica para este material normalmente se utiliza la de control de hormigón fresco, aunque su comportamiento nada tenga que ver con la tierra. En cuanto a las condiciones ambientales, se desconoce la humedad relativa a las que están sometidos los especímenes durante el tiempo de "curado", lo que dificulta la comparación entre estudios.

Intentar dar respuesta a la pregunta planteada implicaría realizar una gran campaña experimental, fuera del alcance de un Proyecto Final de Máster, por lo que de momento seguimos sin tener un criterio único para estimar el tiempo de curado de una probeta de tierra. Sin embargo sí podemos desarrollar un proyecto de investigación relacionado con el planteamiento anterior, y con un tiempo límite de 4 meses, partiendo del concepto *"la tierra es un material higroscópico"*. Estudios realizados en *Forschungslabor für Experimentelles Bauen*, universidad de Kassel, demostraron que la tierra tiene la capacidad de absorber o exudar la humedad ambiental, y a demás este proceso se realiza más rápido y en mayor cantidad que cualquier otro material de construcción (4).

La hipótesis inicial, a partir de la cual se articula la campaña experimental del proyecto, sostiene que las condiciones ambientales a las cuales están sometidas las muestras, influyen en la resistencia a compresión de las mismas. A partir de esta premisa se definen los objetivos del trabajo.



Retenido Ø 8mm



Retenido Ø 4mm



Retenido Ø 2mm

Fotografía 3.1. Árido utilizado para la campaña experimental.  
Granulometría retenida desde 8 a 2 mm.



Retenido Ø 1mm



Retenido Ø 0,5mm



Retenido Ø 0,25mm

Fotografía 3.2. Árido utilizado para la campaña experimental.  
Granulometría retenida desde 1 a 0,25 mm.

### Primer objetivo

Determinar la relación que existe entre la humedad relativa ambiental, en relación a la estabilidad higroscópica de las muestras, y su resistencia a compresión. Para llevar a cabo el objetivo, se fabricarán 20 probetas de tierra, sin estabilizantes o aditivos, con el mismo porcentaje de agua inicial.

### Segundo objetivo

Valorar si existen diferencias significativas al sustituir el agua de la red pública, utilizada para fabricar las probetas, por agua de cal. El agua de cal es una solución con un pH básico que al mezclarse con las partículas de arcilla, reorganiza sus iones, y crea dispersión entre las partículas, es decir, trabaja como fluidificante. Esta modificación produce un aumento de la plasticidad de la arcilla, con el mismo porcentaje de agua inicial, evitando la formación de grumos durante el amasado (1).

También se valorará si existen diferencias significativas, entre las muestras fabricadas con agua de la red pública o con agua de cal, a partir del estudio de sus características mecánicas ya que durante el proceso de estabilidad higroscópica con el ambiente, la tierra estabilizada con agua de cal forma una estructura más rígida, con mayor fragilidad pero con una resistencia a compresión superior.

A partir de los objetivos descritos se propone realizar el siguiente plan de ensayos:

### Caracterización del Material

- Determinación de la curva granulométrica por vía húmeda.
- Determinación de los límites de Atterberg.
- Contenido de sales solubles.
- Contenido de materia orgánica.
- Composición de las arcillas a partir del análisis de difracción por rayos X.



### Fase Experimental. Primera parte

- Determinación de la humedad óptima de un suelo a partir del ensayo Proctor.
- Composición de la curva granulométrica.
- Fabricación de 20 muestras de tierra compactada mecánicamente.
- Conservación de las muestras a diferentes humedades ambientales.
- Determinación del tiempo de estabilidad higroscópico de las muestras.
- Determinación de la densidad inicial y final de las muestras.
- Determinación del módulo de elasticidad dinámico de las muestras.
- Determinación de la resistencia a compresión de las muestras.
- Determinación de la humedad real, inicial y final de las muestras.

### Fase Experimental. Segunda parte

- Fabricación de 10 muestras de tierra con agua de cal compactada mecánicamente.
- Conservación de las muestras a diferentes humedades ambientales.
- Determinación del tiempo de estabilidad higroscópico de las muestras.
- Determinación de la densidad inicial y final de las muestras.
- Determinación del módulo de elasticidad dinámico de las muestras.
- Determinación de la resistencia a compresión de las muestras.
- Determinación de la humedad real, inicial y final de las muestras.



Retenido  $\varnothing$  0,125mm



Retenido  $\varnothing$  0,063mm



Retenido base

Fotografía 3.3. Árido utilizado para la campaña experimental.  
Granulometría retenida desde 0,25mm a base.



#### **4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL**

---



La tierra utilizada en este proyecto procede del Polígono Industrial de Aquiberia en Castellbisbal. Forma parte del material guardado durante la construcción del prototipo *S-Low*, construido en el año 2013. A partir de la construcción de este prototipo nacen diferentes líneas de investigación, desarrolladas en forma de Proyectos Finales de Grado y/o Máster, que todas tienen como premisa inicial la tierra como material de construcción y su experimentación *in situ* gracias a la construcción de un prototipo a escala real (42) (11) (10) (13) (12).

A demás de los proyectos docentes vinculados al prototipo experimental, de los cuales también se nutre éste, también ha servido para realizar estudios comparativos con el grupo de investigación GREa, de la Universitat de Lleida, que han propiciado la asistencia a diferentes congresos entre los años 2014 y 2016 (22) (23) (31).

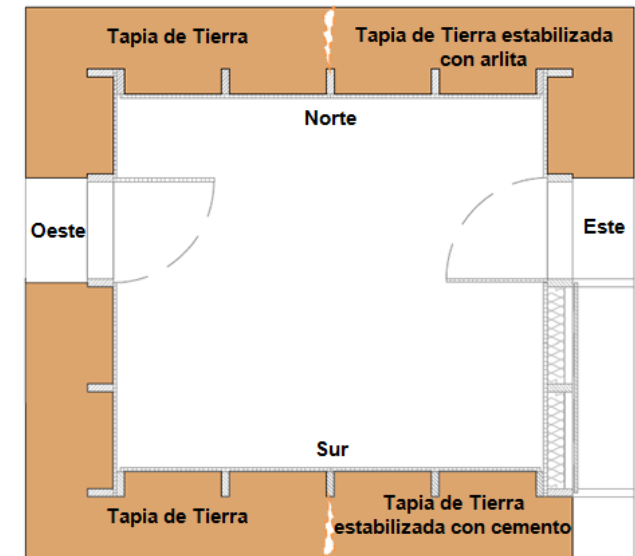


Gráfico 4.1. Croquis en planta del prototipo S-Low. Fuente propia (13).



Fotografía 4.2. Estado actual del prototipo S-Low. Fuente propia (23).

<sup>1</sup>. El prototipo *S-Low* nace a partir de la iniciativa de la empresa *S-Low*, fundada por los arquitectos Ángel Estévez y Sandra Martín, en colaboración con el *Laboratori de Materials de l'EPSEB*, departamento de Construccions Arquitectòniques II de la *Universitat Politècnica de Catalunya*.

#### 4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

##### 4.1.1. OBJETIVO

Analizar la distribución granulométrica del suelo objeto de estudio, a partir de la utilización de tamices normalizados según norma UNE 7050-2, siguiendo la metodología para tamizado vía húmeda.

##### 4.1.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación forman parte del estudio *Experimental rammed earth prototypes in Mediterranean climate, International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Arquitectura*. Valencia, 2014 (22).

##### 4.1.3. PROCESO Y RESULTADOS

Los materiales y procedimientos utilizados se encuentran detallados en la UNE 103101:1995. Los resultados se presentan en forma de tabla para el proceso de tamizado por vía húmeda, detallando las distintas fracciones que componen la muestra objeto de estudio (tabla 4.1.3.1.); y en forma de gráfica la distribución granulométrica de la muestra por vía húmeda (gráfico 4.1.3.2).

Obertura tamices (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado total (g)	Retenido parcial (%)	Pasa en muestra total	
				(g)	%
16	0,00	0,00	0,00	2006,60	100,00
8	391,55	19,51	19,51	1615,05	80,49
4	318,22	15,86	35,37	1296,83	64,63
2	189,79	9,46	44,83	1107,04	55,17
1	72,04	3,59	48,42	1035,00	51,58
0,5	113,59	5,66	54,08	921,41	45,92
0,25	134,50	6,70	60,78	786,91	39,22
0,125	109,12	5,44	66,22	677,79	33,78
0,063	113,13	5,64	71,86	564,66	28,14
< 0,063	564,66	28,14	100,00	0,00	0,00

Tabla 4.1.3.1. Datos granulométrico en húmedo según ensayo UNE 103101:1995.

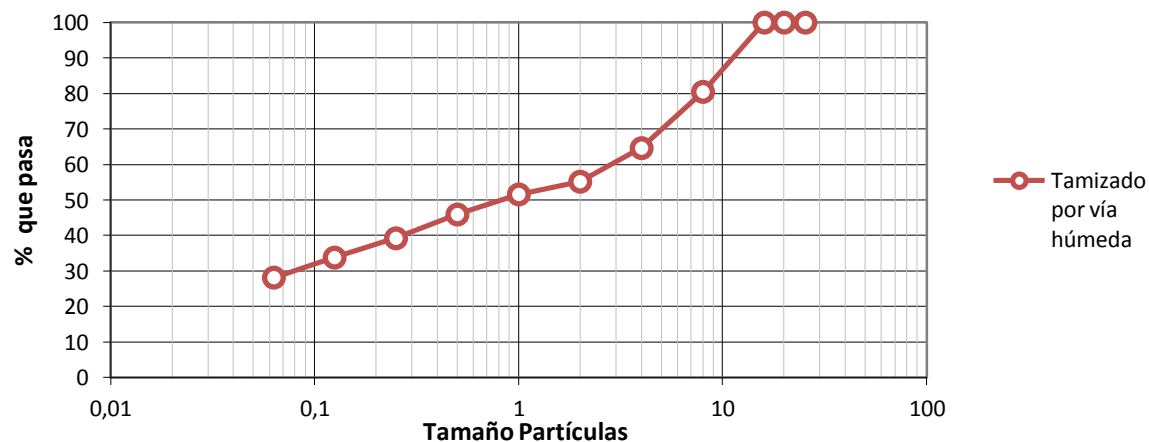


Gráfico 4.1.3.2. Curva granulométrica ensayo UNE 103101:1995.

## 4.2. DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO DE UN SUELO POR EL MÉTODO DEL APARATO DE CASAGRANDE

### 4.2.1. OBJETIVO

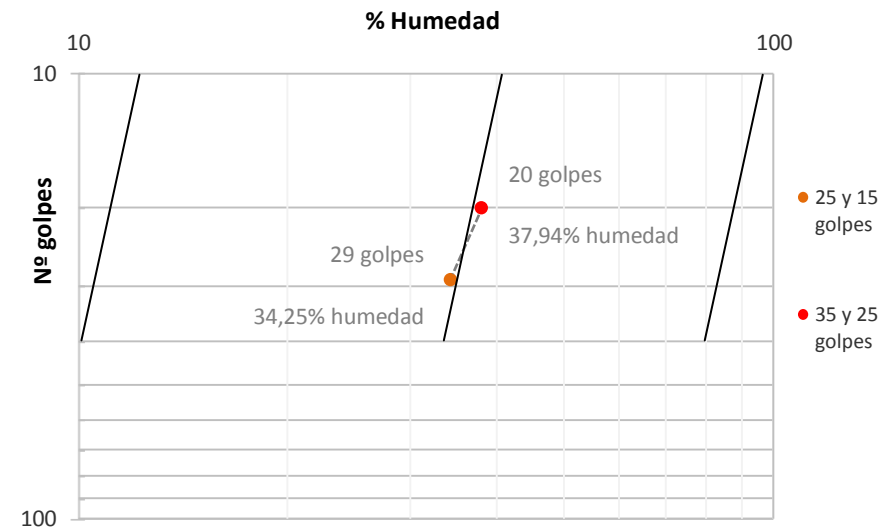
Determinar la humedad, del suelo objeto de estudio, necesaria para perder su plasticidad y dejar de ser moldeable.

### 4.2.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación forman parte del estudio *Experimental rammed earth prototypes in Mediterranean climate, International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Arquitectura*. Valencia, 2014 (22).

### 4.2.3. PROCESO Y RESULTADOS

Los materiales y procedimientos utilizados se encuentran detallados en la UNE 103103:1994. A continuación se exponen los datos obtenidos en forma de gráfica, indicando la humedad en cada punto (gráfico 4.2.3.1).



Gráfica 4.2.3.1. Resultado límite líquido según UNE 103101:1995.

## 4.3. DETERMINACIÓN DE LÍMITE PLÁSTICO DE UN SUELO

### 4.3.1. OBJETIVO

Determinar la humedad mínima del suelo para ser moldeado.

### 4.3.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación forman parte del estudio *Experimental rammed earth prototypes in Mediterranean climate, International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Arquitectura*. Valencia, 2014 (22).

### 4.3.3. PROCESO Y RESULTADOS

Los materiales y procedimientos utilizados se encuentran detallados en la UNE 103104:1993.

Muestra	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (g)	Humedad (%)
Fracción A	8,06	6,50	1,56	24,00
Fracción B	11,48	9,25	2,23	24,11

Tabla 4.3.3.1. Resultado límite líquido según UNE 103101:1995.

#### 4.4. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD

##### 4.4.1. OBJETIVO

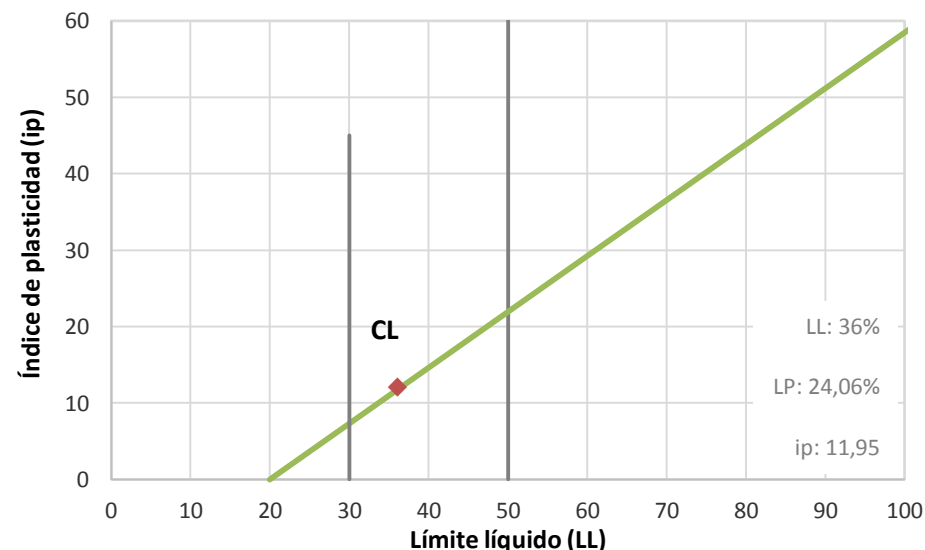
Determinar el rango de humedades en el cual el suelo objeto de estudio tiene un comportamiento plástico.

##### 4.4.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación forman parte del estudio *Experimental rammed earth prototypes in Mediterranean climate, International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Arquitectura*. Valencia, 2014 (22).

##### 4.4.3. PROCESO Y RESULTADOS

La determinación del índice de plasticidad se obtiene a partir de la diferencia entre el límite líquido y el plástico. Su resultado se grafica en la Carta de Casagrande para suelos cohesivos, gráfica 4.4.3.1.



Gráfica 4.4.3.1. Carta de Casagrande para suelos cohesivos.

#### 4.5. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE SALES SOLUBLES DE UN SUELO

##### 4.5.1. OBJETIVO

Determinar de forma cuantitativa los gramos de sales solubles que contiene el suelo objeto de estudio.

##### 4.5.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación forman parte del Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades térmicas y mecánicas del sistema modular S-Low*, 2014 (13).

##### 4.5.3. PROCESO Y RESULTADOS

Los materiales y procedimientos utilizados se encuentran detallados en la UNE 103205:2006.

Muestra	Peso inicial (g)	Sales solubles		g residuo/l	%
		r (g)	Media r (g)		
Fracción A	50	0,34	0,40	4	0,04
Fracción B	50	0,46			

Tabla 4.5.3.1. Resultado sales solubles en el suelo objeto de estudio.



#### 4.6. DETERMINACIÓN CON AGUA OXIGENADA DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS

##### 4.6.1. OBJETIVO

Determinar de forma aproximada, método semicuantitativo, el contenido de materia orgánica que contiene el suelo objeto de estudio.

##### 4.6.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación forman parte del Proyecto Final de Grado *Informe de las propiedades térmicas y mecánicas del sistema modular S-Low*, 2014 (13).

##### 4.6.3. PROCESO Y RESULTADOS

Los materiales y procedimientos utilizados se encuentran detallados en la UNE 7368:1977.

Peso muestra inicial (g)	Peso recipiente (g)	Peso muestra final con tara (g)	Peso muestra final (g)	Diferencial (%)
20,00	232,32	252,02	19,70	1,50

Tabla 4.6.3.1. Resultado contenido de materia orgánica en el suelo objeto de estudio.

#### 4.7. COMPOSICIÓN DE LAS ARCILLAS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN POR RAYOS X

##### 4.7.1. OBJETIVO

Determinar la composición cristalina de los minerales que contiene el suelo objeto de estudio.

##### 4.7.2. OBSERVACIONES

Los datos expuestos a continuación forman parte del estudio *Correlación de NTD versus resistencia a compresión en tapia*, XII Congrès mondial sur les architectures de terre. Lyon, 2016 (31).

##### 4.7.3. PROCESO Y RESULTADOS

Después de obtener una muestra en formato polvo, ésta se presiona sobre una placa de vidrio para obtener una superficie plana sobre un soporte estándar cilíndrico de 16mm de diámetro y 2,5mm de altura. El difractómetro utilizado es de impulso PANalytical X'Pert PRO MPD Alpha1. La radiación utilizada es de cobre Cu  $K\alpha_1$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ).

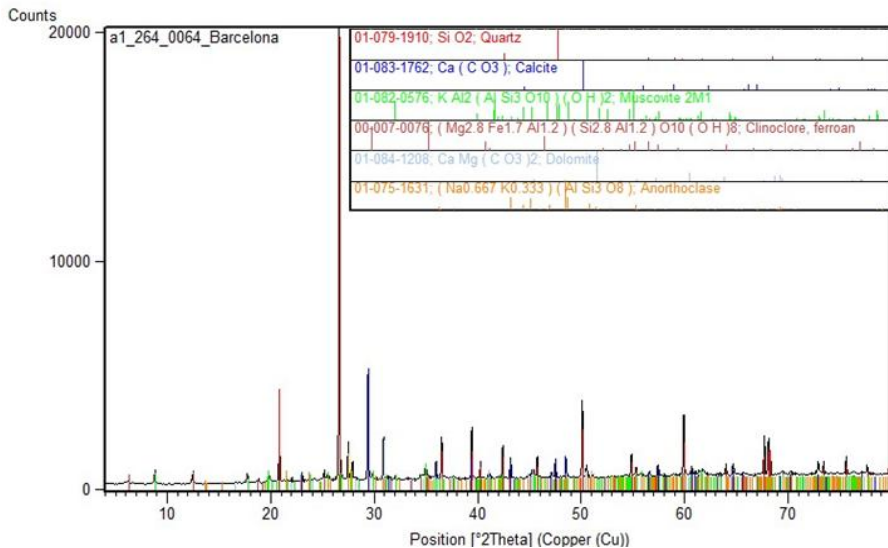


Tabla 4.7.3.1. Resultado contenido de materia orgánica en el suelo objeto de estudio.

#### **4.8. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

A partir de todos los resultados obtenidos anteriormente tenemos la caracterización física del material estudiado. De este modo podremos comparar los datos obtenidos de nuestro estudio con otros trabajos.

Nuestro material, según la clasificación unificada de Casagrande, es una arcilla de mediana plasticidad (CL), con un contenido de finos del 28 % compuesto por limos y arcillas.

Tiene un contenido de sales solubles del 0,04 %, y un contenido de materia orgánica del 1,5 % por lo que se considera un material apto para la construcción con tierra (13).

La composición tipológica de las arcillas se compone de moscovita y clinocloro principalmente, que son arcillas de baja plasticidad, aunque también hay cuarzo, anortoclasa (feldespato sódico-potásico), calcita y dolomita que corresponden a partículas de tamaño arcilla.

## **5. FASE EXPERIMENTAL. PRIMERA PARTE**

---



El primero de los objetivos de este estudio es conocer la relación entre la humedad relativa de las muestras y su resistencia a compresión. Para poder llegar a esa comparación es imprescindible cuantificar el porcentaje de agua necesaria para fabricar las probetas. En nuestro caso estudiaremos la relación entre la humedad óptima del suelo y la densidad máxima que se puede obtener con la distribución granulométrica estudiada, a través del ensayo Proctor Normal, para determinar el porcentaje óptimo de agua utilizado en la fabricación de las muestras.

### 5.1. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD ÓPTIMA DE UN SUELO A PARTIR DEL ENSAYO PROCTOR NORMAL

#### 5.1.1. OBJETIVO

Determinar la humedad óptima del suelo objeto de estudio para conocer su densidad seca máxima.

#### 5.1.2. OBSERVACIONES

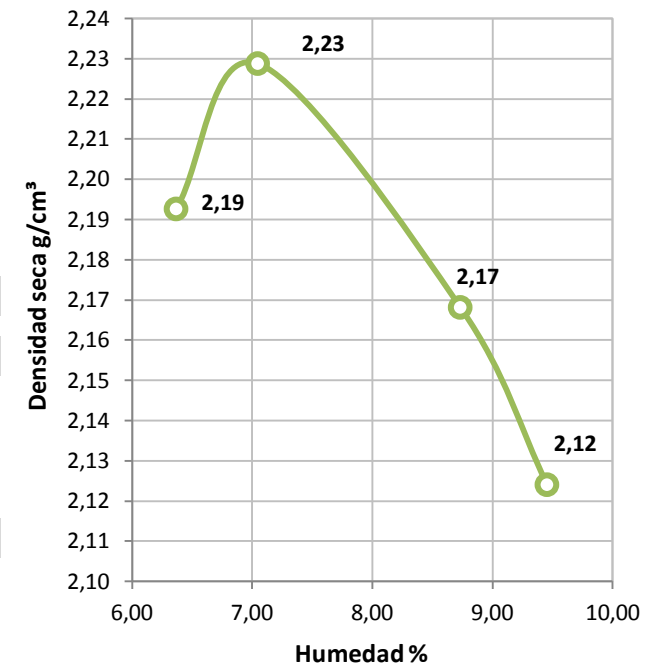
Los datos expuestos a continuación forman parte del estudio *Experimental rammed earth prototypes in Mediterranean climate, International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Arquitectura*. Valencia, 2014 (22).

#### 5.1.3. PROCESO

Los materiales y procedimientos utilizados se encuentran detallados en la UNE 103500:1994. El procedimiento se ha realizado con medios mecánicos, con la colaboración del Laboratori de Camins de la Universitat Politècnica de Catalunya.

#### 5.1.4. RESULTADOS

Como podemos ver en la gráfica 5.1.3.1., la densidad máxima se obtiene con valores de humedad muy cercanos al 7 %.



Gráfica 5.1.3.1. Resultado del ensayo Proctor Normal. De los dos tipos de ensayo Proctor normativos, Normal y Modificado, se ha optado por realizar el ensayo con la metodología Proctor Normal debido a que la energía de compactación ejercida es 4,5 veces inferior. Es importante tener en cuenta que la energía de compactación influye en el resultado final, obteniéndose una humedad óptima menor cuanto mayor sea la energía de compactación empleada.

Debido a la realidad de la construcción con tierra del territorio, se ha considerado adecuado suponer que la energía de compactación de un elemento tradicional de tierra se representa mejor a partir de la metodología Proctor Normal. Además, este criterio se aplica a todo el estudio desarrollado en este proyecto.



Fotografía 5.2.1. Almacenaje de las 20 fracciones de muestra de tierra con la misma distribución granulométrica.



Fotografía 5.2.2. Desmoldado de una probeta de tierra fabricada a partir de la metodología de ensayo para Proctor Normal.

La primera parte de la fase experimental consiste en la confección de 20 muestras iguales, organizadas en cuatro grupos de estudio, almacenadas durante su estabilización higroscópica a humedades diferentes. Se considera que el tiempo de estabilización higroscópica de las muestras ha concluido cuando su variación de peso, a lo largo del tiempo, sea estable.

### 5.2. COMPOSICIÓN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA

Para garantizar que la tierra almacenada corresponde a la curva granulométrica estudiada anteriormente, se divide y clasifica la totalidad del material a utilizar por tamaño de partículas; y posteriormente se recompone la curva granulométrica obteniendo 20 fracciones iguales, de 3 Kg cada una, a partir de los datos de la tabla 4.1.3.1. (Fotografía 5.2.1.). La metodología utilizada para separar las diferentes fracciones, en las que se compone el material, es la descrita en la norma UNE 103101:1995 Análisis de suelo por tamizado por vía húmeda.

### 5.3. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Antes de fabricar las muestras se deseca el material para eliminar la humedad ambiental que tiene en condiciones de laboratorio. El sistema de fabricación de probetas se realiza siguiendo la metodología del ensayo Proctor Normal, ya que es un método fácilmente reproducible y a demás garantiza que la densidad obtenida se aproximará mucho a la densidad máxima que puede tener el suelo.

A partir de estas indicaciones se fabrican 20 probetas de tierra con una humedad aportada del 7 %, un volumen inicial de  $937,79 \text{ cm}^3$ , y una densidad media inicial de  $2302,23 \text{ Kg/m}^3$ . Inmediatamente después de fabricar las muestras, éstas se introducen dentro del ambiente donde se conservarán hasta su estabilidad higroscópica.

#### 5.4. CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS A DIFERENTES HUMEDADES AMBIENTALES

El proyecto se ha realizado con cuatro ambientes:

- Ambiente "A": 30 % de humedad.
- Ambiente "B": 50 % de humedad.
- Ambiente "C": 85 % de humedad.
- Ambiente "D": 100 % de humedad.

Excepto el ambiente "D", que se han introducido las probetas en la cámara húmeda ( $\pm 98$  % HR) del Laboratori de Materials de l'EPSEB, el resto de ambientes se ha conseguido a través de la estabilización de cúpulas de ensayo con sales en su interior. Las sales utilizadas son hidróxido de sodio (humedad 30 %), nitrato de magnesio (humedad 50 %), y el cloruro de sodio (humedad 85 %).

#### 5.5. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE ESTABILIDAD HIGROSCÓPICA DE LAS MUESTRAS

Como sabemos, a partir de los estudios realizados en *Forschungslabor für Experimentelles Bauen* (9), la tierra es un material higroscópico que tiende a estabilizar su humedad con la del entorno donde se encuentra el elemento.

A partir de esta premisa, se estima que las muestras habrán finalizado su periodo de estabilidad higroscópica con el ambiente cuando su variación de peso, a lo largo del tiempo, sea inferior o igual a  $\pm 0,1$  %.

Durante la fase experimental de estabilización higroscópica de las probetas se han tenido algunas dificultades, sobre todo al principio del proceso, derivadas de la fluctuación de las cúpulas en el momento de la extracción de las muestras. A medida que las muestras se han estabilizado por completo con el ambiente el problema ha tendido a desaparecer.



Fotografía 5.4.1. Cúpula con probetas hasta el 85 % de humedad.



Fotografía 5.4.2. Cúpula con probetas hasta el 30 % de humedad.



Fotografía 5.4.3. Probetas en el interior de la cámara húmeda.





Fotografía 5.7.1. Ensayo ultrasonido con palpadores.



Fotografía 5.7.2. Determinación de las dimensiones de la muestra y la frecuencia longitudinal por impacto.

### 5.6. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD INICIAL Y FINAL DE LAS MUESTRAS

Tanto al inicio como al final de la campaña experimental se han tomado lecturas de la variación de dimensional de las muestras. Además, gracias al control realizado para determinar la estabilización higrotérmica de las probetas, se dispone de datos referentes a la variación de la masa de las muestras en los estados finales del proceso experimental.

Con estos datos se puede determinar la densidad inicial y final de cada una de las muestras, así como la variación que se ha producido en función del ambiente donde ha realizado la estabilización higroscópica de la muestra.

Inicialmente se planteaba la posibilidad de tomar lecturas, tanto de las dimensiones como de los pesos de las diferentes muestras, pero debido al problema de la estabilización de los ambientes interiores de las cúpulas sólo se disponen de datos iniciales y finales.

### 5.7. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (MOE)

Existen investigaciones recientes que afirman que existe correlación entre la velocidad de propagación de la onda ultrasónica con la resistencia a compresión de elementos contruidos en tierra (43).

A partir de esta información se han realizado los ensayos de determinación de la velocidad de propagación mediante onda ultrasónica, con el instrumento de ultrasonidos y los palpadores planos de 55 KHz, y la determinación del módulo de elasticidad dinámico, a través de la determinación de frecuencia fundamental de resonancia longitudinal generada por impacto del material.

Los ensayos se han realizado, tras la estabilización higroscópica de las muestras en los diferentes ambientes estudiados.



### **5.8. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS**

Para determinar la resistencia a compresión, es necesario que las caras sobre las cuales se aplique la carga sean planas y paralelas entre sí. Normalmente, en probetas de hormigón/mortero, se refrentan sus caras con azufre o con mortero de cemento aluminoso, para garantizar que la carga aplicada se reparte uniformemente por toda la superficie. En nuestro caso se utiliza un método alternativo, una cama de arena fina, ya que es menos agresivo con las muestras a ensayar y disminuye el riesgo de alterar la humedad retenida por la muestra durante la realización de este ensayo.

En algunos casos, únicamente en las muestras que han estabilizado su humedad en el interior de la cámara húmeda, es necesario colocar una capa de arena en las dos caras de la probeta para garantizar que la carga aplicada se reparte uniformemente por toda la superficie y que el valor obtenido no es una carga puntual.

Para realizar el ensayo se ha utilizado la prensa con cédula de carga de 5 Tn, acoplando un extensómetro a su base, y se ha realizado la monitorización a través del equipo de adquisición de datos del Laboratori de Materials de l'EPSEB.

### **5.9. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD REAL, INICIAL Y FINAL DE LAS MUESTRAS**

Durante el proceso de estabilización higroscópica y experimentación no es posible conocer la humedad real del elemento, por lo que se realiza después del ensayo de resistencia a compresión. Éste es el motivo por el cual es tan importante evitar la alteración de humedad de las muestras durante todo el proceso experimental.

La determinación de la humedad se realiza desecando toda la probeta, en una estufa de desecación a 80 °C de temperatura hasta peso constante, para conocer el comportamiento del elemento en conjunto. Normalmente se determina la humedad de la zona central de la probeta, pero en este caso resulta más interesante conocer el comportamiento global del elemento.



Fotografía 5.8.1. Ensayo de resistencia a compresión de probeta de tierra sobre cama de arena fina.



## **6. FASE EXPERIMENTAL. SEGUNDA PARTE**

---



El último de los objetivos de este estudio es valorar si existen diferencias significativas al sustituir el agua utilizada, en la primera parte de la fase experimental, por agua de cal. Para poder realizar esta comparación, la fase experimental descrita a continuación sigue la misma metodología que la descrita anteriormente.

### 6.1. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Antes de fabricar las muestras se deseca el material para eliminar la humedad ambiental que tiene en condiciones de laboratorio. El sistema de fabricado de probetas se realiza siguiendo la metodología del ensayo Proctor Normal, ya que es un método fácilmente reproducible y además garantiza que la densidad obtenida se aproximará mucho a la densidad máxima que puede tener el suelo.

A partir de estas indicaciones, se fabrican 15 probetas de tierra con un porcentaje de agua de cal del 7 %, un volumen inicial de  $937,79 \text{ cm}^3$ , y una densidad media de  $2310,55 \text{ Kg/m}^3$ . Inmediatamente después de fabricar las muestras, éstas se introducen dentro del ambiente donde se conservarán hasta su estabilidad higroscópica.

### 6.2. CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS A DIFERENTES HUMEDADES AMBIENTALES

El proyecto se ha realizado con dos ambientes:

Ambiente "A": 50 % de humedad.

Ambiente "B": 100 % de humedad.

El ambiente "A" se ha conseguido a través de la estabilización de la cúpula de ensayo con sales de hidróxido de sodio (humedad 50 %). Para el ambiente "D" se han introducido las probetas en la cámara húmeda ( $\pm 98 \text{ \% HR}$ ) del Laboratori de Materials de l'EPSEB.



Fotografía 6.1.1. Proceso fabricación de una probeta.



Fotografía 6.2.1. Cúpula con probetas hasta el 50% de humedad.



Fotografía 6.2.2. Cúpula con probetas hasta el 50% de humedad.



Fotografía 6.2.3. Probetas en el interior de la cámara húmeda.



Fotografía 6.2.1. Ensayo de ultrasonidos con palpadores (55 kHz).

### **6.3. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE ESTABILIDAD HIGROSCÓPICA DE LAS MUESTRAS**

Se estima que las muestras habrán finalizado su periodo de estabilidad higroscópica con el ambiente cuando su variación de peso, a lo largo del tiempo, sea inferior o igual al  $\pm 0,1 \%$ .

Durante la fase experimental de estabilización higroscópica de las probetas se han sufrido algunas dificultades, sobre todo al principio del proceso y como consecuencia de las altas temperaturas de los meses de verano.

### **6.4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD INICIAL Y FINAL DE LAS MUESTRAS**

Tanto al inicio como al final de la campaña experimental se han tomado lecturas de la variación de dimensional de las muestras. Además, gracias al control realizado para determinar la estabilización higrótérmica de las probetas, se dispone de datos referentes a la variación de la masa de las muestras en los estados finales del proceso experimental. Con estos datos se puede determinar la densidad inicial y final de cada una de las muestras, así como la variación que se ha producido en función del ambiente donde ha realizado la estabilización higroscópica de la muestra.

Inicialmente se planteaba la posibilidad de tomar lecturas, tanto de las dimensiones como de los pesos de las diferentes muestras, pero debido al problema de la estabilización de los ambientes interiores de las cúpulas sólo se disponen de datos iniciales y finales.

### **6.5. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (MOE)**

Se han realizado los ensayos de determinación de la velocidad de propagación mediante onda ultrasónica, con el instrumento de ultrasonidos y los palpadores planos de 55 kHz, y la determinación del módulo de elasticidad dinámico, a través de la determinación de frecuencia fundamental de resonancia longitudinal generada por impacto del material. Los ensayos se han realizado, tras la estabilización higroscópica de las muestras en los diferentes ambientes estudiados.



#### **6.6. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS**

Para determinar la resistencia a compresión, se realiza el mismo procedimiento explicado anteriormente en el punto "5.8. *Determinación de la resistencia a compresión de las muestras*".

En algunos casos, únicamente en las muestras que han estabilizado su humedad en el interior de la cámara húmeda, es necesario colocar una capa de arena en las dos caras de la probeta para garantizar que la carga aplicada se reparte uniformemente por toda la superficie y que el valor obtenido no es una carga puntual.

#### **6.7. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD REAL, INICIAL Y FINAL DE LAS MUESTRAS**

Para determinar la humedad real al inicio y al final de la campaña experimental, se realiza el mismo procedimiento explicado anteriormente en el punto "5.9. *Determinación de la humedad real, inicial y final de las muestras*".



Fotografía 6.6.1. Ensayo de resistencia a compresión de probeta de tierra con de arena fina en ambas caras.





## 7. RESULTADOS

---



### 7.1.RESULTADOS PRIMERA FASE EXPERIMENTAL

Durante la fase experimental del proyecto se han obtenido valores de resistencia a compresión, módulo de elasticidad dinámico (MOE), variación de densidad y variación de humedad, para cada una de las 20 muestras ensayadas.

Como se ha explicado anteriormente, las probetas ensayadas se clasifican en 4 grupos de 5 muestras cada uno para los ambientes 30 % HR, 50 % HR, 85% HR y 100 % HR. Para facilitar la interpretación de los datos, se ha optado por clasificar cada ambiente con un color diferente y cada muestra con una tonalidad del color escogido.

En la tabla 7.1.5. se muestran la relación entre la nomenclatura de las muestras y sus colores, en función de la humedad relativa a las cuales se han estabilizado higroscópicamente, para facilitar la compresión de las gráficas siguientes.

30 % HR		50 % HR		85 % HR		100 % HR	
	<b>Muestra 6</b>		<b>Muestra 11</b>		<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 16</b>
	<b>Muestra 7</b>		<b>Muestra 12</b>		<b>Muestra 2</b>		<b>Muestra 17</b>
	<b>Muestra 8</b>		<b>Muestra 13</b>		<b>Muestra 3</b>		<b>Muestra 18</b>
	<b>Muestra 9</b>		<b>Muestra 14</b>		<b>Muestra 4</b>		<b>Muestra 19</b>
	<b>Muestra 10</b>		<b>Muestra 15</b>		<b>Muestra 5</b>		<b>Muestra 20</b>

Tabla 7.1.5. Relación entre la nomenclatura de las muestras y su representación gráfica por colores.

A continuación se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros analizados.



Fotografía 7.1.1. Muestras en ambiente del 85 % HR.



Tabla 7.1.2. Muestras en ambiente del 30% HR.



Tabla 7.1.3. Muestras en ambiente del 50 % HR.



Tabla 7.1.4. Muestra en ambiente del 100 % HR.

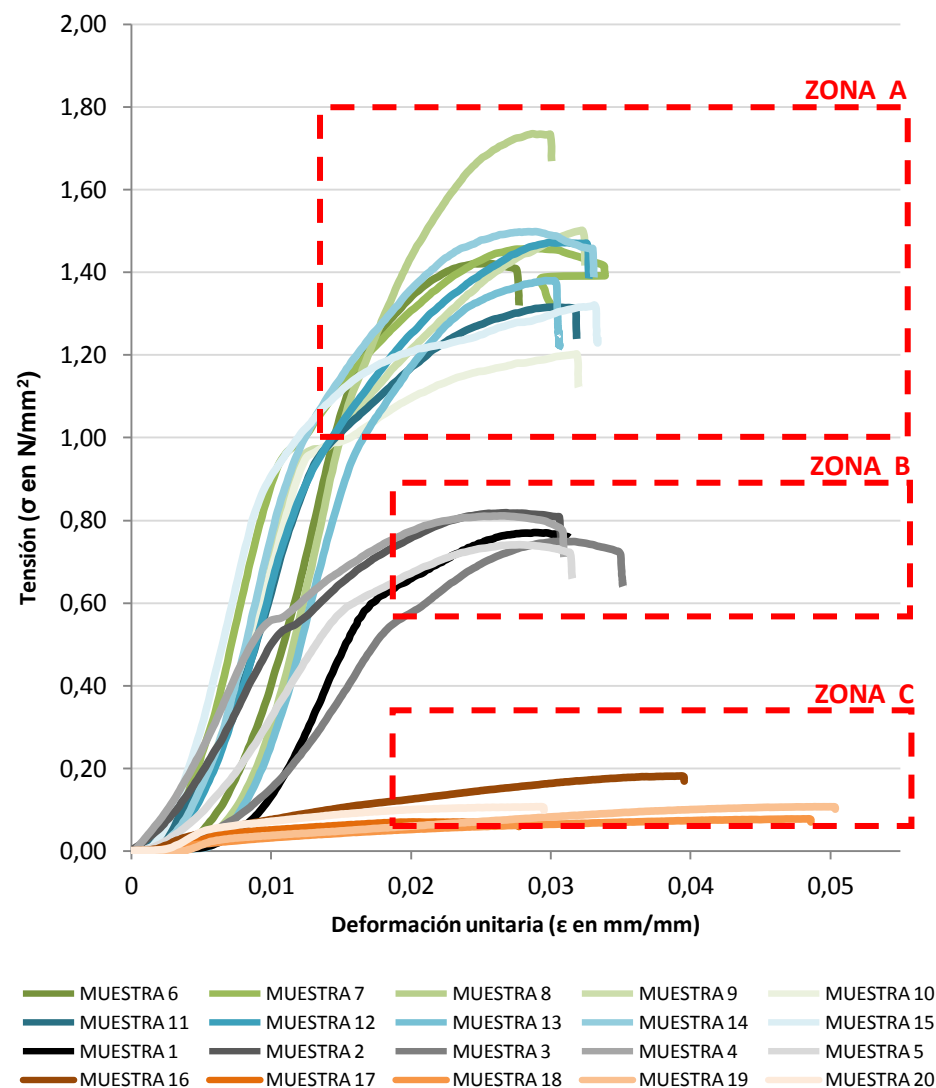
Como vemos en la en la gráfica 7.1.6., existen tres zonas claramente diferenciadas, las cuales hemos denominado "Zona A", "Zona B" y "Zona C".

La "Zona A" corresponde a los valores de las muestras estabilizadas en los ambientes al 30 % HR y al 50 % HR. Como se puede ver, los valores están sobrepuestos entre sí y no hay diferencias significativas entre ellos, a demás son los más elevados en relación al resto de datos obtenidos, con un valor medio de resistencia a compresión máxima de  $1,43 \text{ N/mm}^2$  y una deformación unitaria media de  $0,030 \text{ mm/mm}$ . La muestra 8 es la que tiene valores más elevados de resistencia a compresión.

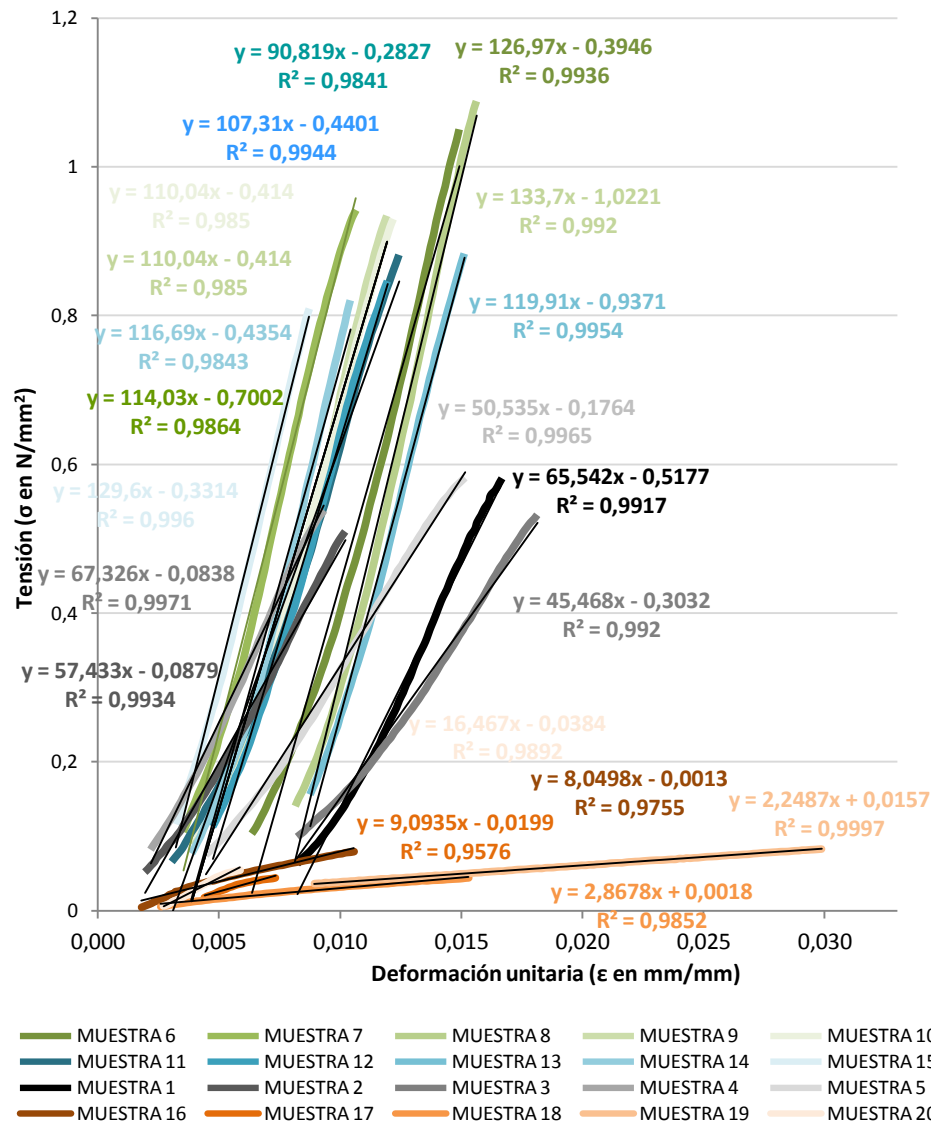
La "Zona B" corresponde a los valores de la muestras estabilizadas con el ambiente al 85 % HR. Como se puede ver, los valores se encuentran en la zona central del gráfico y corresponden aproximadamente a la mitad de los obtenidos de la "Zona A", con un valor medio de resistencia a compresión máxima de  $0,78 \text{ N/mm}^2$  y una deformación unitaria media de  $0,032 \text{ mm/mm}$ .

La "Zona C" corresponde a los valores de la muestras estabilizadas con el ambiente al 100 % HR. Como se puede ver, los valores se encuentran en la zona baja del gráfico y corresponden aproximadamente a la doceava parte de los obtenidos de la "Zona A", con un valor medio de resistencia a compresión máxima de  $0,11 \text{ N/mm}^2$  y una deformación unitaria media de  $0,040 \text{ mm/mm}$ .

Otra tendencia que podemos ver es que a medida que aumenta la resistencia del elemento, su rigidez también aumenta. Esta tendencia la estudiamos con mayor profundidad en el gráfico 7.1.7.



Gráfica 7.1.6. Gráfica tensión deformación unitaria de las 20 muestras analizadas.



Gráfica 7.1.7. Gráfica tensión deformación unitaria de las 20 muestras analizadas.

En la gráfica 7.1.7., se representan las pendientes de las rectas en zona elástica de la tensión deformación que corresponden a cada una de las muestras ensayadas.

Como vemos existen dos zonas claramente diferenciadas. Por un lado tenemos las pendientes de las rectas naranjas (100 % HR) y por el otro tenemos el resto de valores, aunque sí se aprecia la diferencia entre las pendientes de las rectas grises (85 % HR) y las verdes y azules (30 % y 50 % HR respectivamente) que son muy similares.

Si analizamos los valores de las dos gráficas, podemos ver claramente que cuanto mayor es la humedad relativa del ambiente, en el cual estabilizamos las muestras de tierra, el material tiene mayor plasticidad y deformación, y su resistencia es mucho menor.

Por otra parte, a partir de las ecuaciones de las pendientes del gráfico 7.1.7., podemos conocer el módulo de elasticidad estático de las muestras y comparar estos datos con los obtenidos a partir del ensayo de determinación de la frecuencia fundamental de resonancia longitudinal generada por impacto del material. También se podrían comparar los datos del gráfico con los resultados del ensayo por ultrasonidos, pero no hemos obtenido valores en ninguna de las muestras analizadas.

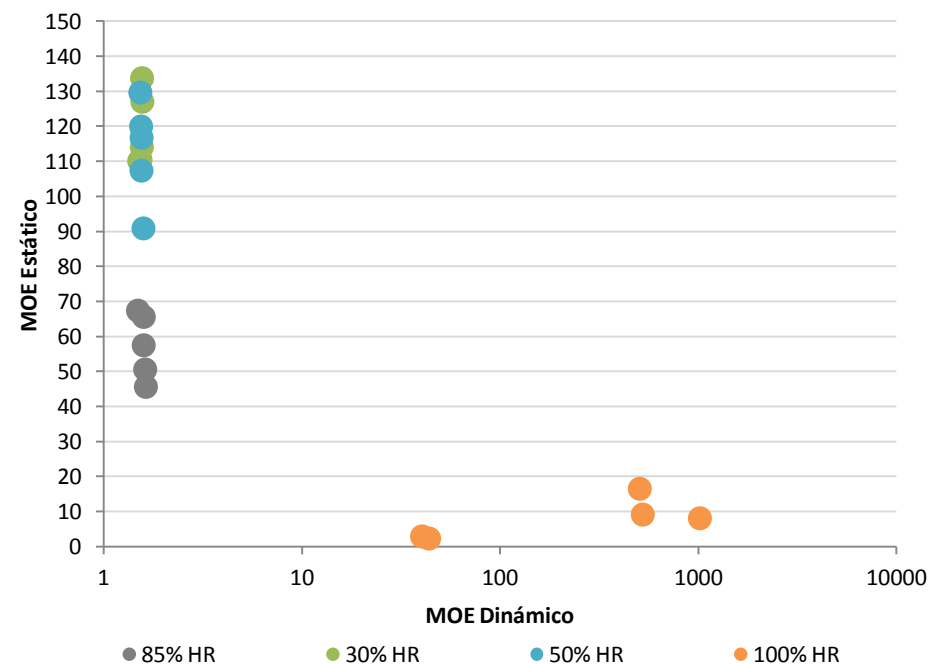
En la tabla 7.1.8. se recogen los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico para cada una de las muestras analizadas, así como el valor medio de la serie, y en el gráfico 7.1.9. se relacionan los valores del módulo de elasticidad estático con el dinámico.

Si observamos los valores obtenidos representados en el gráfico, veremos que no parece haber ninguna correlación aceptable entre los datos obtenidos mediante los ensayos de frecuencia fundamental de resonancia longitudinal con los calculados a partir de la pendiente de la recta de tensión deformación.

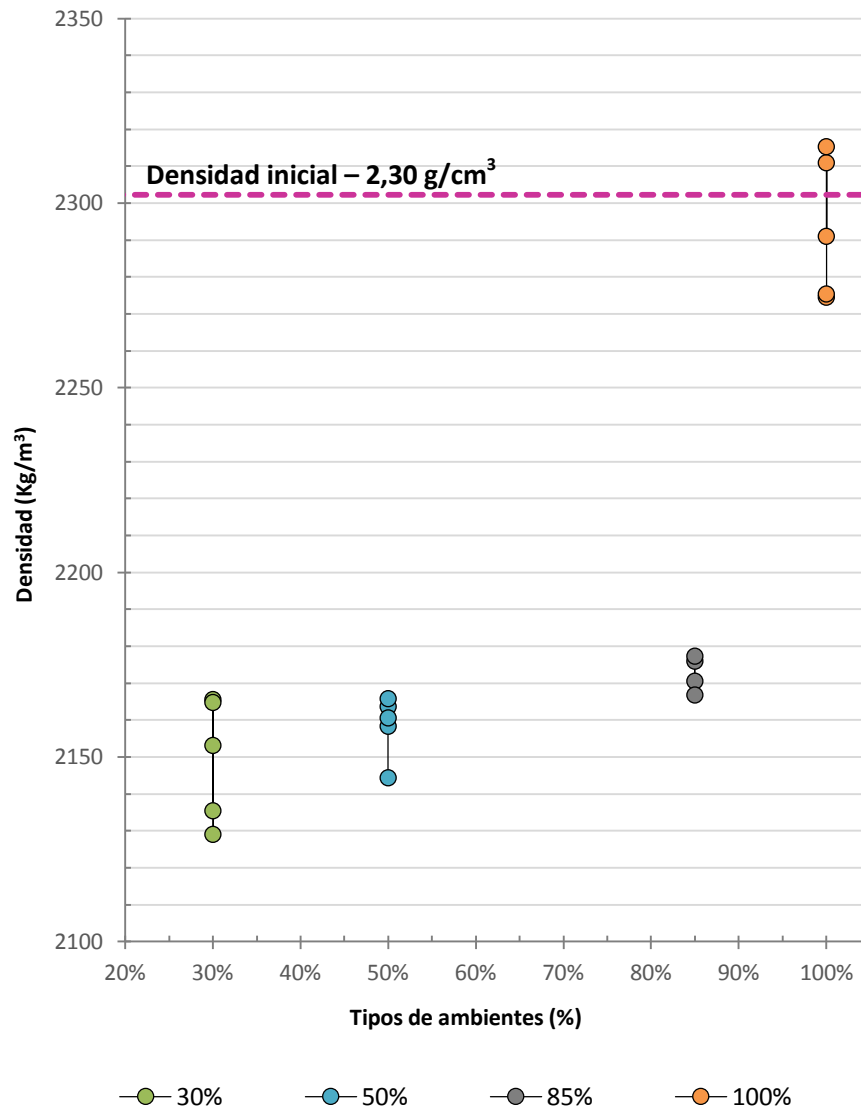
A pesar de ello, sí podemos ver que los valores obtenidos para los ambientes 30 % HR, 50 % HR y 85 % HR tienen poca dispersión de resultados en comparación a los valores obtenidos en el ambiente del 100 % HR. Además, de la misma forma que pasaba en las gráficas anteriores, no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en los ambientes 30 % HR y 50 % HR.

30%HR		50%HR		85%HR		100%HR	
MOE Est.	MOE Din.	MOE Est.	MOE Din.	MOE Est.	MOE Din.	MOE Est.	MOE Din.
114,03	1,56	90,82	1,59	65,54	1,59	8,05	1021,09
126,97	1,57	107,31	1,55	57,43	1,59	9,09	525,76
133,70	1,56	119,91	1,54	45,47	1,63	2,87	40,45
110,04	1,51	116,69	1,55	67,33	1,49	2,25	43,88
110,04	1,53	129,60	1,53	50,54	1,62	16,47	507,90
<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>
119,03	1,55	112,87	1,55	57,28	1,59	7,75	427,81

Tabla 7.1.8. Valores de MOE estático y dinámico para cada tipo de ambiente y el valor promedio de los resultados de cada grupo.



Gráfica 7.1.9. Relación entre el MOE Estático y el MOE Dinámico



En la gráfica 7.1.10., se representan las densidades finales de cada muestra analizada en función del ambiente a las cuales han sometidas, y la densidad inicial de las muestras.

Como vemos existen dos zonas claramente diferenciadas. Por un lado tenemos los valores naranjas (100 % HR) y por el otro tenemos el resto, aunque sí se aprecia la diferencia entre los resultados grises (85 % HR) y los verdes y azules (30 % y 50 % HR respectivamente) que son muy similares.

Los valores en el ambiente de 100 % HR son más dispersos y oscilan alrededor de la densidad inicial de las muestras, dando como resultado una densidad media final de  $2,29 \text{ g/cm}^3$ .

Los valores en el ambiente de 85 % HR son muy similares entre ellos, dando como resultado una densidad media final de  $2,17 \text{ g/cm}^3$ .

Los valores en el ambiente de 50 % HR tienen algún valor que se escapa del grupo, dando como resultado una densidad media final de  $2,16 \text{ g/cm}^3$ .

Finalmente, los valores en el ambiente de 30 % HR son dispersos y muy próximos a los valores en el ambiente de 50 % HR, dando como resultado una densidad media final de  $2,15 \text{ g/cm}^3$ .

Gráfica 7.1.10. Relación entre los tipos de ambientes y la densidad final de las muestras.

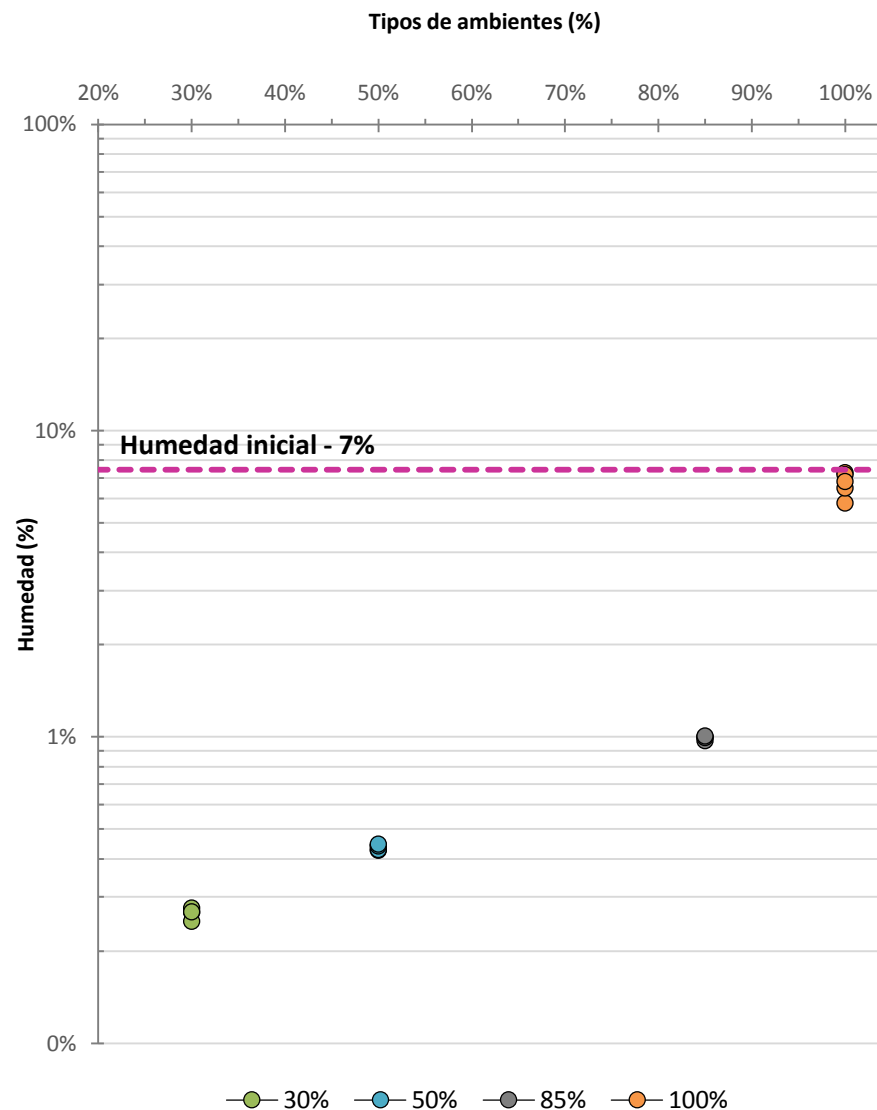
En la gráfica 7.1.11., se representan la variación de humedad que han tenido cada una de las muestra analizada en función del ambiente a las cuales han sometidas, y la humedad inicial aportada durante su fabricación. Como vemos existen cuatro zonas claramente diferenciadas.

Los valores en el ambiente de 100 % HR son homogéneos y oscilan alrededor próximos a la humedad inicial de las muestras, dando como resultado un porcentaje de humedad medio del 6,71 %.

Los valores en el ambiente de 85 % HR son homogéneos, dando como resultado un porcentaje de humedad medio del 0,99 %.

Los valores en el ambiente de 50 % HR son homogéneos, dando como resultado un porcentaje de humedad medio del 0,44 %.

Finalmente, los valores en el ambiente de 30 % HR son homogéneos, dando como resultado un porcentaje de humedad medio del 0,27 %.



Gráfica 7.1.11. Relación entre los tipos de ambientes y la humedad final de las muestras.



## 7.2.RESULTADOS SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

Durante la fase experimental del proyecto se han obtenido valores de resistencia a compresión, módulo de elasticidad dinámico (MOE), variación de densidad y variación de humedad, para 4 de las 10 muestras fabricadas con agua de cal. El resto de muestras se han conservado en los ambientes para estudios futuros.

Como se ha explicado anteriormente, las probetas ensayadas se clasifican en 2 grupos de 5 muestras cada uno para los ambientes 50 % HR y 100 % HR. Para facilitar la interpretación de los datos, se ha optado por clasificar cada ambiente con un color diferente y cada muestra con una tonalidad del color escogido.

En la tabla 7.2.3. se muestran la relación entre la nomenclatura de las muestras y sus colores, en función de la humedad relativa a las cuales se han estabilizado higroscópicamente, para facilitar la compresión de las gráficas siguientes. Las muestras sin color son las no analizadas.

50 % HR		100 % HR	
	Muestra 4		Muestra 1
	Muestra 8		Muestra 2
	Muestra 10		Muestra 6
	Muestra 13		Muestra 7
	Muestra 15		Muestra 9

Tabla 7.2.3. Relación entre la nomenclatura de las muestras y su representación gráfica por colores.

A continuación se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros analizados.



Tabla 7.1.1. Muestras en ambiente del 30% HR.



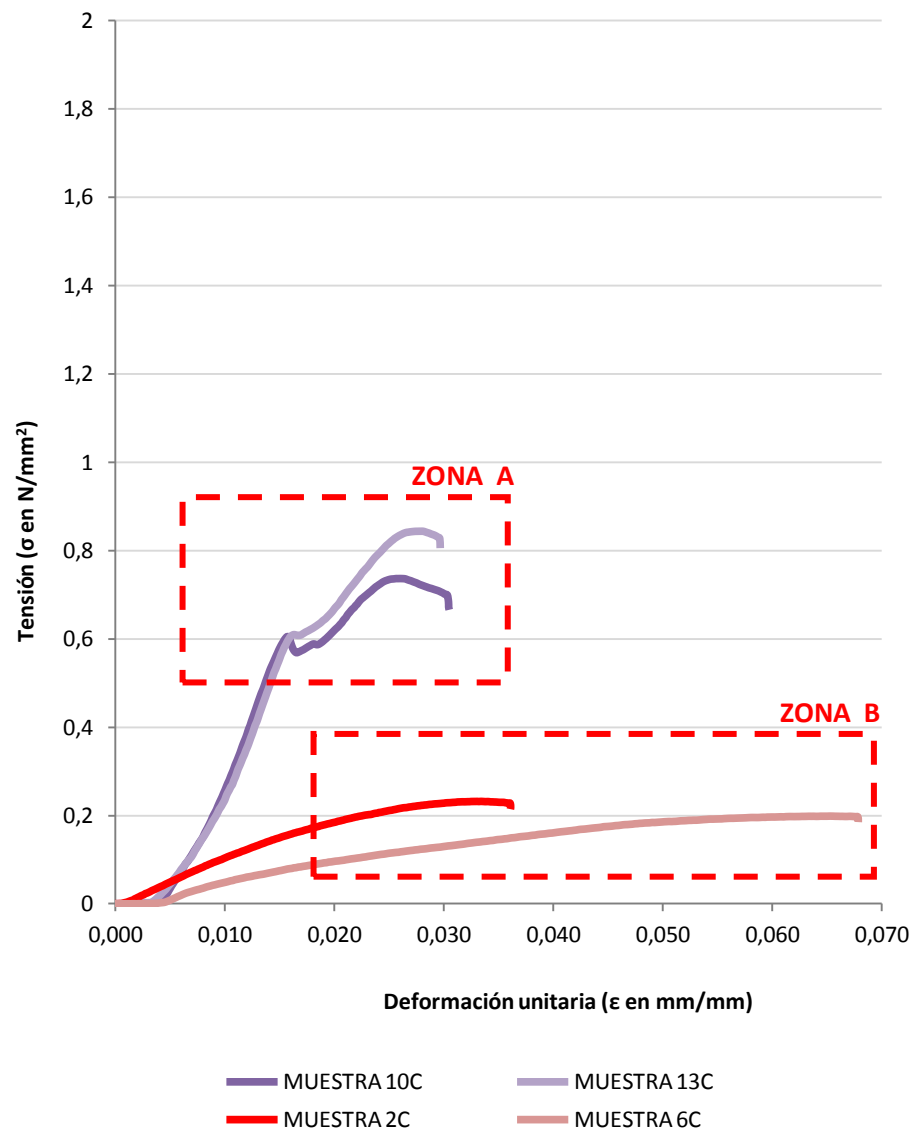
Tabla 7.1.2. Muestra en ambiente del 100 % HR.

Como vemos en la gráfica 7.2.4., existen dos zonas claramente diferenciadas, las cuales hemos denominado "Zona A" y "Zona B".

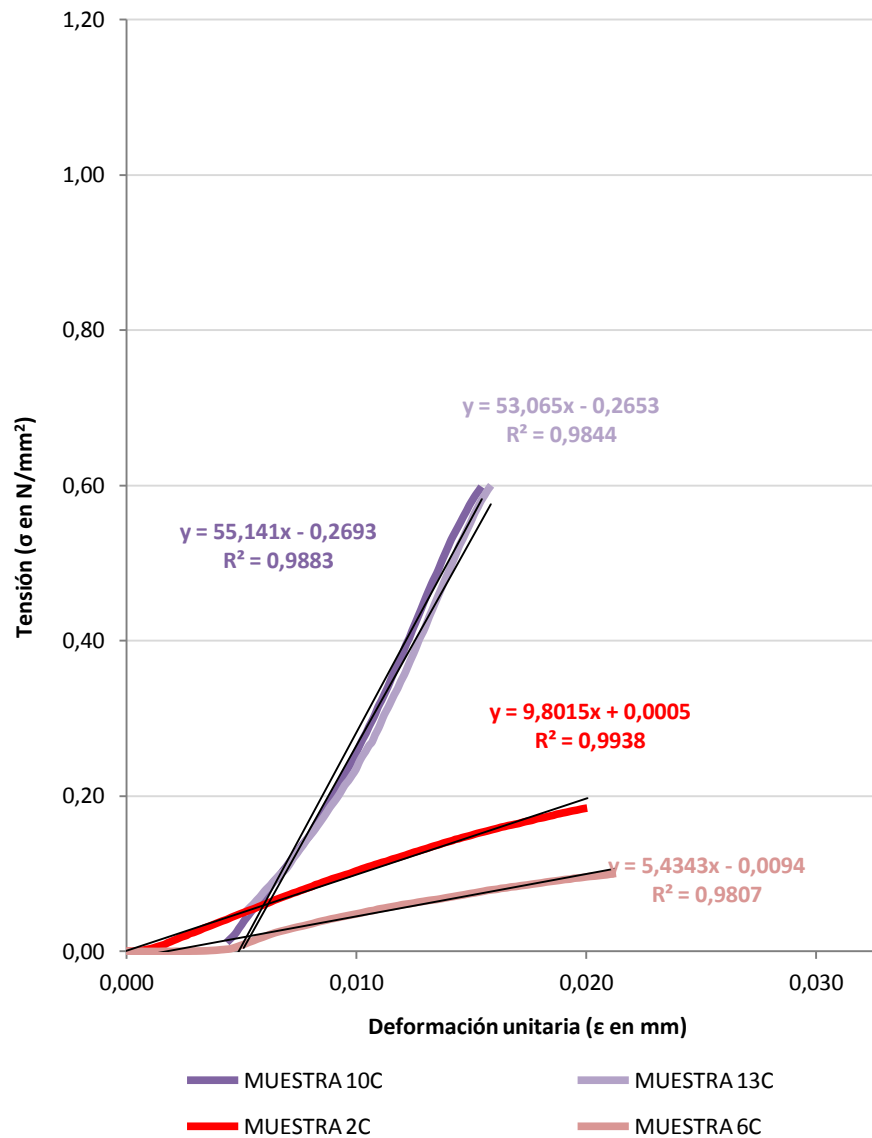
La "Zona A" corresponde a los valores de las muestras estabilizadas con el ambiente al 50 % HR. Como se puede ver, los valores son los más elevados en relación al resto de datos obtenidos, con un valor medio de resistencia a compresión máxima de  $0,79 \text{ N/mm}^2$  y una deformación unitaria media de  $0,030 \text{ mm/mm}$ .

La "Zona B" corresponde a los valores de las muestras estabilizadas con el ambiente al 100 % HR. Como se puede ver, los valores se encuentran en la zona baja del gráfico y corresponden aproximadamente a la doceava parte de los obtenidos de la "Zona A", con un valor medio de resistencia a compresión máxima de  $0,22 \text{ N/mm}^2$  y una deformación unitaria media de  $0,053 \text{ mm/mm}$ .

Otra tendencia que podemos ver es que a medida que aumenta la resistencia del elemento, su rigidez también aumenta. Esta tendencia la estudiamos con mayor profundidad en el gráfico 7.2.5.



Gráfica 7.2.4. Gráfica tensión deformación unitaria de las 4 muestras analizadas.



En la gráfica 7.2.5., se representan las pendientes de las rectas en zona elástica de la tensión deformación que corresponden a cada una de las muestras ensayadas.

Como vemos existen dos zonas claramente diferenciadas. Por un lado tenemos las pendientes de las rectas rojas (100 % HR) y por el otro tenemos las lilas (50 % HR).

Si analizamos los valores de las dos gráficas, podemos ver claramente que cuanto mayor es la humedad relativa del ambiente, en el cual estabilizamos las muestras de tierra, el material tiene mayor plasticidad y deformación pero su resistencia es mucho menor.

Por otra parte, a partir de las ecuaciones de las pendientes del gráfico 7.2.5., podemos conocer el módulo de elasticidad estático de las muestras y comparar estos datos con los obtenidos a partir del ensayo de determinación de la frecuencia fundamental de resonancia longitudinal generada por impacto del material. También se podrían comparar los datos del gráfico con los resultados del ensayo por ultrasonidos, pero no hemos obtenido valores en ninguna de las muestras analizadas.

Gráfica 7.2.5. Gráfica tensión deformación unitaria de las 4 muestras analizadas.

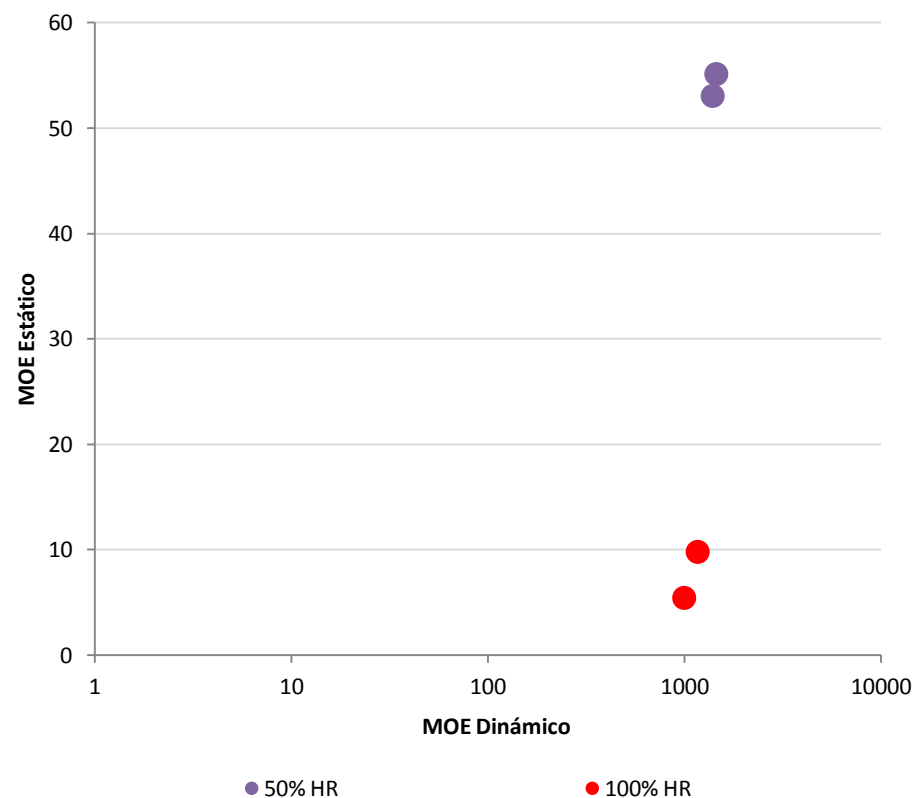
En la tabla 7.2.6. se recogen los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico para cada una de las muestras analizadas, así como el valor medio de la serie, y en el gráfico 7.2.7. se relacionan los valores del módulo de elasticidad estático con el dinámico.

Si observamos los valores obtenidos representados en el gráfico, de la misma forma que pasa con las muestras anteriores, veremos que no parece haber ninguna correlación aceptable entre los datos obtenidos mediante los ensayos de frecuencia fundamental de resonancia longitudinal con los calculados a partir de la pendiente de la recta de tensión deformación.

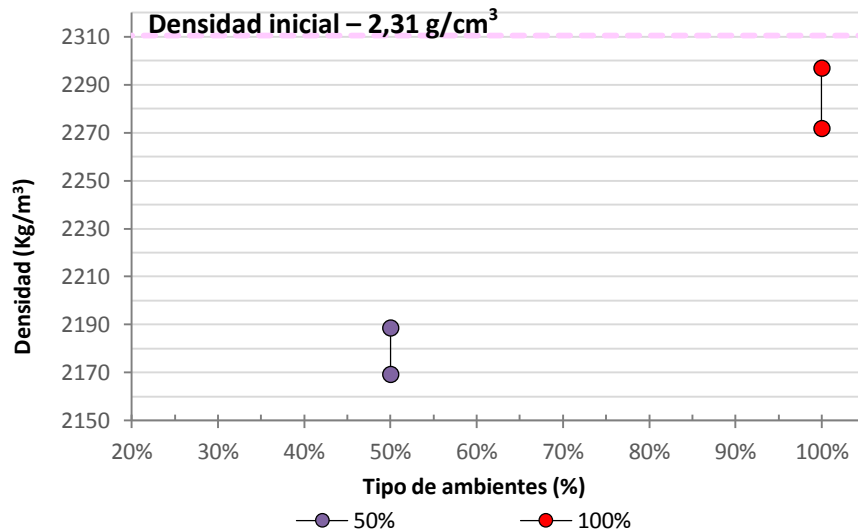
A pesar de ello, sí podemos ver que los valores obtenidos para el ambiente 50 % HR tiene poca dispersión de resultados en comparación a los valores obtenidos en el ambiente del 100 % HR.

50%HR		100%HR	
MOE Est.	MOE Din.	MOE Est.	MOE Din.
55,14	1450,80	9,80	1166,48
53,07	1390,58	5,43	996,08
Media	Media	Media	Media
54,10	1420,69	7,62	1081,28

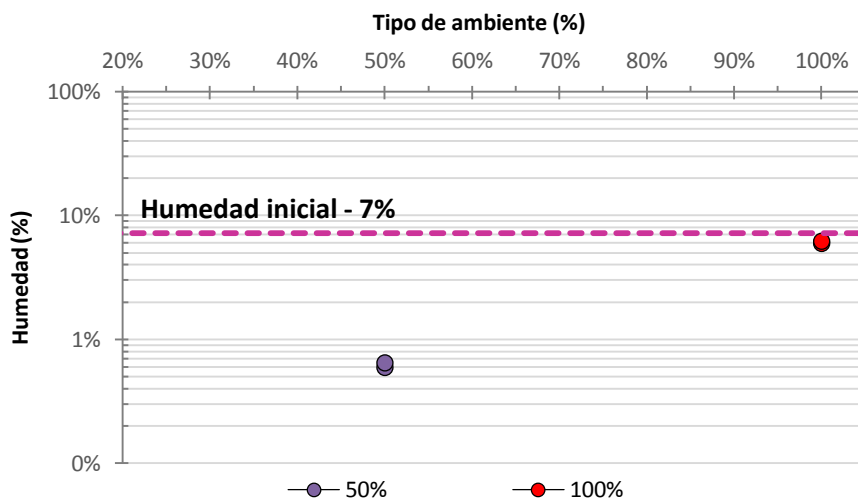
Tabla 7.2.6. Valores de MOE estático y dinámico para cada tipo de ambiente y el valor promedio de los resultados de cada grupo.



Gráfica 7.2.7. Relación entre el MOE Estático y el MOE Dinámico



Gráfica 7.2.8. Relación entre los tipos de ambientes y la densidad final de las muestras.



Gráfica 7.2.9. Relación entre los tipos de ambientes y la humedad final de las muestras.

En la gráfica 7.2.8., se representan las densidades finales de cada muestra analizada en función del ambiente a las cuales han sometidas, y la densidad inicial de las muestras.

Como vemos existen dos zonas claramente diferenciadas. Por un lado tenemos los valores rojos (100 % HR) y por el otro tenemos los lilas (50 % HR).

Los valores en el ambiente de 100 % HR son dispersos, aunque la muestras es poco representativa y sería necesario realizar más ensayos para conocer la naturaleza de la dispersión, y son valores cercanos a la densidad inicial de las muestras, dando como resultado una densidad media final de  $2,28 \text{ g/cm}^3$ .

Los valores en el ambiente de 50 % HR son dispersos, aunque la muestras es poco representativa y sería necesario realizar más ensayos para conocer la naturaleza de la dispersión, dando como resultado una densidad media final de  $2,18 \text{ g/cm}^3$ .

En la gráfica 7.2.9., se representan la variación de humedad que han tenido cada una de las muestra analizada en función del ambiente a las cuales han sometidas, y la humedad inicial aportada durante su fabricación.

Los valores en el ambiente de 100 % HR son homogéneos y oscilan alrededor próximos a la humedad inicial de las muestras, dando como resultado un porcentaje de humedad medio del 6,04 %.

Los valores en el ambiente de 50 % HR son homogéneos, dando como resultado un porcentaje de humedad medio del 0,62 %.

### 7.3. RESULTADOS COMPARATIVOS

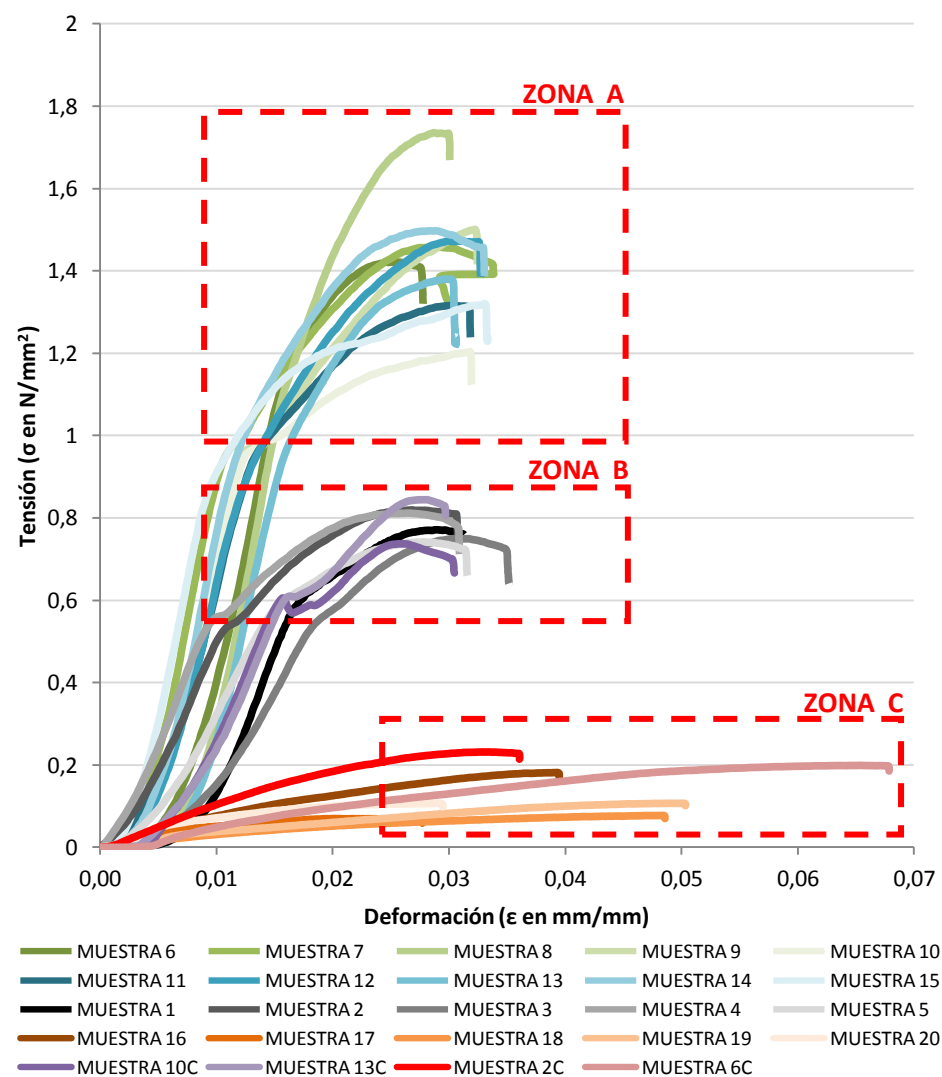
A partir de los datos anteriores, se comparan los resultados obtenidos entre las muestras fabricadas con agua y las muestras con agua de cal.

Como vemos en la en la gráfica 7.3.1., existen tres zonas claramente diferenciadas, las cuales hemos denominado "Zona A", "Zona B" y "Zona C", de las cuales, la "Zona B" es la más interesante.

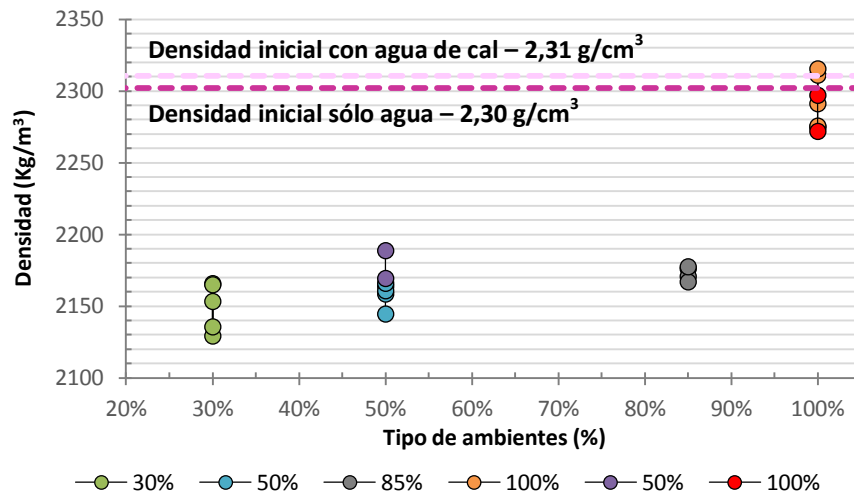
La "Zona A" corresponde a los valores de las muestras estabilizadas en los ambientes al 30 % HR y al 50 % HR sólo agua.

La "Zona B" corresponde a los valores de la muestras estabilizadas con el ambiente al 85 % HR sólo agua y con el ambiente 50 % HR con agua de cal. Como se puede ver, los valores se encuentran en la zona central del gráfico y corresponden aproximadamente a la mitad de los obtenidos de la "Zona A" y no existe una diferencia significativa entre las probetas realizadas con agua y las realizadas con agua de cal.

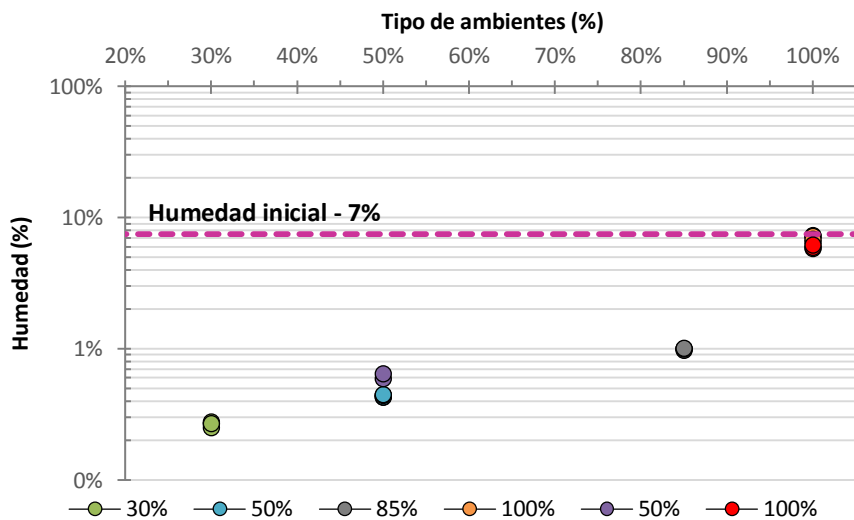
La "Zona C" corresponde a los valores de la muestras estabilizadas con el ambiente al 100 % HR, tanto sólo agua como agua de cal. Como se puede ver, los valores se encuentran en la zona baja del gráfico y corresponden aproximadamente a la doceava parte de los obtenidos de la "Zona A". Las muestras fabricadas con agua de cal tienen unos valores de resistencia muy similares a las otras muestras, aunque parece que su deformación es mayor. Esta tendencia no la podemos demostrar actualmente ya que la muestra ensayada es muy pequeña y no resulta representativa.



Gráfica 7.3.1. Gráfica tensión deformación unitaria de las 20 muestras analizadas.



Gráfica 7.3.2. Relación entre los tipos de ambientes y la densidad final de las muestras.



Gráfica 7.3.3. Relación entre los tipos de ambientes y la humedad final de las muestras.

En la gráfica 7.3.2., se representan las densidades finales de cada muestra analizada en función del ambiente a las cuales han sometidas, y la densidad inicial de las muestras. Como vemos existen dos zonas claramente diferenciadas. Por un lado tenemos los valores naranjas y rojos (100 % HR) y por el otro tenemos los verdes, azules y lilas, y grises (30 %, 50 % y 85% HR respectivamente).

Lo más significativo de esta gráfica es que los valores lilas tienen una densidad más elevada que las muestras al 50% HR sólo agua, y su valor es más cercano a los valores obtenidos con las muestras estabilizadas al 85 % HR. Los valores en el ambiente de 100 % HR son dispersos para los dos grupos de muestras, y todos los valores obtenidos son muy cercanos a la densidad inicial.

En la gráfica 7.3.3., se representan la variación de humedad que han tenido cada una de las muestra analizada en función del ambiente a las cuales han sometidas, y la humedad inicial aportada durante su fabricación.

Todos los valores que pertenecen al ambiente de 100 % HR son homogéneos y oscilan alrededor próximos a la humedad inicial de las muestras.

Lo más significativo de esta gráfica es que los valores lilas (50 % HR con probetas con agua de cal) tienen una menor pérdida de humedad, si se compara con su homólogo fabricado con solo agua. Su humedad final se encuentra entre los valores de humedad relativa del 50 % HR y 85 % HR de probetas de sólo agua.

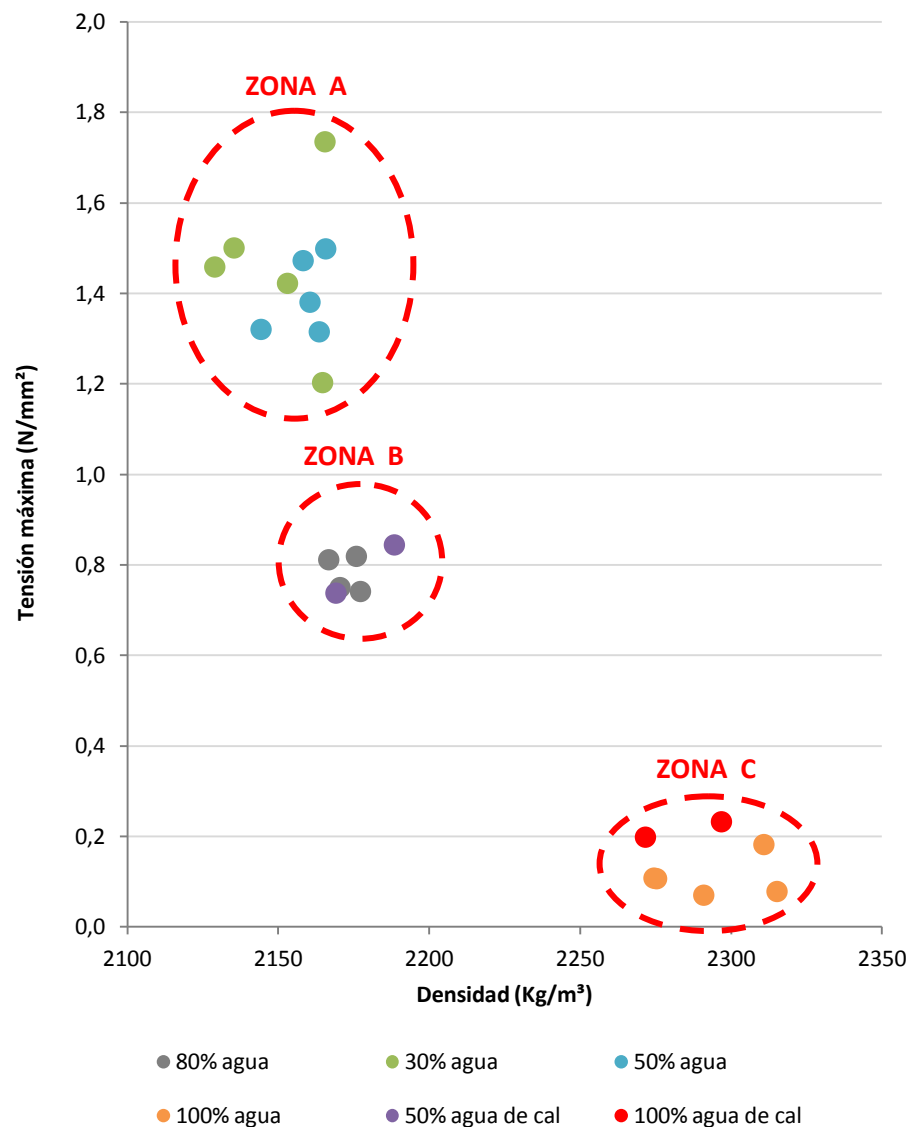
Como vemos en la en la gráfica 7.2.4., existen tres zonas claramente diferenciadas, las cuales hemos denominado "Zona A", "Zona B" y "Zona C".

La "Zona A" corresponde a los valores de las muestras estabilizadas en los ambientes al 30 % HR y al 50 % HR sólo agua. Como ya se veía en la gráfica 7.1.6., tenemos un valor con un valor de resistencia superior al resto y de los valores del grupo, es el que tiene una densidad mayor.

La "Zona B" corresponde a los valores de la muestras estabilizadas con el ambiente al 85 % HR sólo agua y con el ambiente 50 % HR con agua de cal. Como se puede ver, los valores se encuentran en la zona central del gráfico con una densidad media 2,17 g/cm<sup>3</sup>.

La "Zona C" corresponde a los valores de la muestras estabilizadas con el ambiente al 100 % HR, tanto sólo agua como agua de cal. Como se puede ver, los valores se encuentran en la zona baja del gráfico. También podemos ver que hay una dispersión importante entre las muestras.

Otro dato destacable que podemos observar es que las muestras estabilizadas en ambientes menos secos, tienen una densidad menor y una tensión máxima superior.



Gráfica 7.2.4. Gráfica tensión máxima respecto densidad de las muestras.



## 8. CONCLUSIONES

---



Para desarrollar este Proyecto Final de Máster, se ha partido de todo un trabajo ya realizado anteriormente, desarrollado durante los últimos 3 años, por diferentes estudiantes de Grado y/o de Máster, grupos de investigación y por trabajos no académicos en los que la autora ha participado de forma directa. A demás, se han realizado numerosos ensayos en laboratorio con el objetivo de conocer la influencia de las condiciones ambientales, a las cuales están sometidas unas muestras de tierra, en la resistencia a compresión de las mismas.

Las características de la tierra utilizada en la fase experimental, a través de los ensayos de caracterización de tierra. En nuestro caso disponemos un suelo cohesivo con arcillas de mediana plasticidad, con un contenido de finos del 28 % compuesto por limos y arcillas, con un límite líquido del 36% y un límite plástico del 24,06% de humedad. La composición tipológica de las arcillas se compone de moscovita y clinocloro principalmente (arcillas de baja plasticidad), aunque también hay cuarzo, anortoclasa, calcita y dolomita que corresponden a partículas de tamaño arcilla. Tiene un contenido de sales solubles del 0,04 % y un contenido de materia orgánica del 1,5 % por lo que se considera un material apto para la construcción con tierra.

Una vez conocemos las características de la tierra que vamos a utilizar, podemos estudiar cual es su humedad óptima y definir la cantidad de agua necesaria para conseguir la mejor compactación y la mayor densidad de nuestras muestras. Para nuestra tierra la humedad óptima es del 7%, obteniendo una densidad seca máxima de  $2,23 \text{ g/cm}^3$ . Con este valor podemos desarrollar la campaña experimental fabricando 20 probetas de tierra con un 7 % de agua y 10 probetas de tierra con un 7% de agua de cal e introduciendo

las muestras, divididas en grupos de 5 muestras, en cúpulas a diferentes ambientes (30 %, 50 %, 85 % y 100 % HR).

Una vez las muestras se han estabilizado higroscópicamente en cada uno de los ambientes, se han realizado diferentes ensayos para poder comprobar si la humedad ambiental es un factor a tener presente cuando se trabaja con tierra. En este sentido se han estudiado su variación de humedad y densidad, su módulo de elasticidad estático y dinámico y su resistencia a compresión.

Para el ambiente al 100 % HR la pérdida de humedad fue del 4,14% para las muestras sólo agua y del 13,7 % para las muestras con agua de cal, con una densidad del  $2,29 \text{ g/cm}^3$  para las muestras de sólo agua y del  $2,28 \text{ g/cm}^3$  para las de agua con cal. Para el ambiente al 85 % HR la pérdida fue del 86% para las muestras sólo agua, con una densidad del  $2,17 \text{ g/cm}^3$ . Para el ambiente al 50 % HR la pérdida fue del 94% para las muestras sólo agua y del 91 % para las muestras con agua de cal, con una densidad del  $2,16 \text{ g/cm}^3$  para las muestras de sólo agua y del  $2,18 \text{ g/cm}^3$  para las de agua con cal. Para el ambiente al 30 % HR la pérdida fue del 96 % para las muestras sólo agua, con una densidad del  $2,15 \text{ g/cm}^3$ .

Tal y como se ha comentado en el apartado de resultados, no se ha obtenido una correlación entre los valores del módulo de elasticidad estático y dinámico en ninguna de las muestras analizadas. Además, no ha sido posible obtener ningún dato con el sistema de ultrasonidos disponible en el Laboratori de Materials de la EPSEB, la lectura siempre marcaba fuera de rango aunque se ha intentado realizar el ensayo en diferentes posiciones y colocando los palpadores en paralelo y en línea recta. Según un estudio reciente (43), existe una relación entre la resistencia a compresión

de un elemento de tierra y la velocidad de propagación del sonido en su masa, pero nosotros no hemos sido capaces de obtener lecturas. Esta es una línea de investigación muy interesante que vale la pena desarrollar en futuros proyectos.

Por otro lado, el estudio más importante que se ha realizado en este proyecto es la relación entre los ambientes y su resistencia a compresión simple. En este sentido los datos reflejan que la relación existe y que es muy importante conocer, y dar a conocer, no sólo de qué humedad inicial parte el elemento, sino cuál es la humedad ambiental a la que está sometido durante su proceso de estabilidad higroscópica y cuál es la humedad del elemento en el momento de conocer su resistencia a compresión. Tal y como se aprecia en la gráfica 7.3.1, para una misma situación inicial existen diferentes resultados de resistencia en función de la humedad que contenga el elemento, habiendo un rango de resultados de  $1,66 \text{ N/mm}^2$  y una varianza de  $0,3 \text{ N/mm}^2$ . Por tanto, a partir de los resultados obtenidos, se considera necesario indicar en todos los estudios este parámetro para poder comparar resultados con otros autores y llegar a determinar, en un futuro, la respuesta planteada al inicio del proyecto *"¿Cuál es el tiempo de "curado" de una probeta determinada de tierra?"*.

Sin embargo, desde la experiencia que aporta este proyecto podemos afirmar que actualmente la mejor condición para estabilizar las probetas higroscópicamente y determinar la resistencia a compresión de un elemento de tierra es cuando el ambiente no supera el 50% de humedad relativa.

Para finalizar, es muy importante destacar el resultado "anómalo" a priori de las muestras realizadas con agua de cal y estilizadas

higroscópicamente al 50 % HR. Como ya se ha comentado anteriormente, el agua de cal es una solución básica que actúa como fluidificante de la arcilla, modificando su estructura interna y propiciando la repulsión de las moléculas entre sí produciendo una dispersión de las arcillas (1). La cantidad de cal que se disuelve en agua es de  $1,6 \text{ g/l}$ , y en nuestro caso se han utilizado aproximadamente  $147 \text{ g}$  de agua para fabricar cada una de las probetas, por lo que la proporción de cal en la muestra ensayada es muy baja ( $0,24\text{g}$  de cal por probeta).

Si bien esta cantidad de cal no ha servido para actuar como estabilizante de la estructura, aumentando la resistencia a compresión de las muestras (44), sí se ha visto una alteración en el comportamiento de las probetas que demuestra que, a pesar de la mínima cantidad de cal que contienen, sí hay interacción visible entre la arcilla contenida en la muestra y el agua de cal aportada. Hasta ahora, las experiencias que se han documentado sobre la incorporación de soluciones básicas en arcillas se han realizado a una escala muy pequeña y no se han encontrado estudios que pudieran relacionar la interacción entre el agua de cal y la arcilla en elementos constructivos como es el tapial.

A partir de esta primera aproximación al tema de la higroscopicidad del material en estado estacionario, se puede seguir investigando para conocer mejor las interacciones del material con la humedad relativa del material en estado dinámico y desarrollar un documento de "buenas prácticas" para la realización e interpretación de datos de resistencia a compresión en elementos de tierra, en laboratorio.

## 9. PROPUESTAS DE FUTURO

---



A partir de las conclusiones obtenidas en este proyecto, han surgido ideas para futuras líneas de investigación que a continuación se detallan.

La primera de las líneas de investigación es el estudio del elemento de tierra dentro de su contexto ambiental, es decir, estudiar el elemento en función de las condiciones ambientales a las que estará sometido en la realidad. Por ejemplo, no serán las mismas condiciones ambientales la que condicionen las características de un elemento de tierra situado en la ciudad de Barcelona, que situado en la ciudad de Valladolid. Como hemos visto, la humedad ambiental influye en la resistencia a compresión del elemento de tierra construido, por lo que sería muy interesante estudiar el comportamiento del elemento existente en relación a las

Por otra parte, tal como hemos visto en este proyecto, al añadir agua de cal en sustitución del agua de pastado y comparando los resultados con las probetas fabricadas con sólo agua, se ha producido un fenómeno no esperado a priori. En un principio, a mayor densidad es lógico esperar que aumente la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad dinámico, y no sólo no pasa, sino que el elemento tiene una resistencia menor y se vuelve más plástico. Consideramos que este fenómeno se produce debido a que la estructura interna del elemento, y más concretamente de las arcillas que lo componen, se ha modificado por la adición del agua de cal pero no disponemos de datos suficientes para demostrar esta teoría. Por este motivo creemos que es una futura línea de investigación que también podría recoger el estudio de la densidad seca máxima del suelo en relación a la humedad óptima con agua de cal y comprar los resultados con los obtenidos en este trabajo.

condiciones ambientales del entorno real y comparar los datos con elementos en diferentes entornos.

Siguiendo la línea de investigación relacionada con la primera idea, se propone estudiar la velocidad de higroscopicidad que tiene la tierra, a partir del estudio de la pérdida de peso del elemento a lo largo del tiempo hasta equilibrarse con el entorno (isotermas). Este estudio se podría plantear tanto en condiciones estáticas como en dinámicas para poder determinar la influencia real del ambiente en los especímenes analizados. Inicialmente, en este Proyecto Final de Máster, se planteó incorporar el estudio de la velocidad de higroscopicidad en periodo estático, pero debido a los problemas de estabilidad de las cúpulas utilizadas no fue posible tomar lecturas fiables.





## 10. BIBLIOGRAFÍA

---



1. **Fontaine, L. y Anger, R.** *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*. París : Éditions Berlin, 2009. ISBN: 978-2-7011-5204-2.
2. **Mileto, C. y Vegas, F.** *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia : TC Cuadernos General de Ediciones de Arquitectura, 2014. ISBN: 978-84-942233-4.
3. **CRAterre.** CRAterre. [En línea] [Citado el: 05 de 09 de 2016.] [www.craterre.org](http://www.craterre.org).
4. **Minke, G.** *Manual de construcción en tierra*. [ed.] Fin de Siglo. Kassel : s.n., 2005.
5. **Houben, H., y otros.** *Traité de construction en terre*. Marseille : Parenthèses, 2006. ISBN: 978-2-86364-161-3.
6. **Rezende, M. y Do Vale, J.** *Adobe with 1% clay and 2,11MPa resistance: a case study*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
7. **Maldonado Ramos, L., Rivera Gámez, D. y Vela Cossío, F.** *Arquitectura y construcción con tierra. Tradición e innovación*. Madrid : Maira Libros, 2002. ISBN: 84-932367-3-X.
8. **Ziegert, C., Röhlen, U. y Schroeder, H.** *Codes and rules for earth building materials in Germany*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terra, 2016.
9. **Minke, Gernot.** *Manual de construcción en tierra*. Segunda edición. Kassel, Alemania : Fin de Siglo, 2005.
10. **García Alcaraz, D.** *Estudio de revestimientos con fibras vegetales*. Barcelona : PFG, UPC, 2013.
11. **Milla, L.** *Desarrollo y estudio de revestimientos con tierra y fibras vegetales a base de paja de cebada y cascarilla de arroz*. Barcelona : PFM, UPC, 2013.
12. **Cayetano, S. y Ghazal, K.** *Estudio de revestimientos de tierra con fibras vegetales de cebada*. Barcelona : Proyecto Final de Grado. UPC, 2014.
13. **González Sánchez, B.** *Informe de las propiedades térmicas y mecánicas del sistema modular S-Low de construcción con estructura de madera y envolvente de tapia*. Barcelona : PFG UPC, 2013.

14. **Font, F. y Hidalgo, P.** *Arquitectura de tapia*. Castellón : Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Castellón, 2009. ISBN: 978846331420.
15. **May, John.** *Casas hechas a mano y otros edificios tradicionales*. Barcelona : Blume, 2011. ISBN: 978-84-9801-523-2.
16. **UNESCO.** Organización de naciones unidas para la educación la ciencia y la cultura. [En línea] [Citado el: 10 de 08 de 2016.] [es.unesco.org](http://es.unesco.org).
17. **Organización Editorial Mexicana.** El Sol de México. [En línea] [Citado el: 15 de 09 de 2016.] [www.elsoldemexico.com.mx](http://www.elsoldemexico.com.mx).
18. **Castellarnau Visús, A.** *Construcción de una vivienda con muros de tapial en Ayerbe, Huesca. Fase 1: Estructura y Cerramientos*. Valladolid : IX Congreso de Tierra en Cuenca de Campos. Fundación General de la Universidad de Valladolid, 2012. ISBN: 978-84-616-3485-9.
19. —. *Contemporary vernacular house, an awareness exercise*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
20. **Pahíno Rodríguez, L., Muñoz de la Calle, D. y Jové Sandoval, F.** *Muros de tierra y hábitat sostenible*. Valladolid : IX Congreso de Tierra en Cuenca de Campos. Fundación General de la Universidad de Valladolid, 2012. ISBN: 978-84-616-348-9.
21. **Díaz Santivañez, M. y Fernández Cadenas, M.** *La certificación energética en edificaciones residenciales de tierra. Obra nueva y obra existente*. Valladolid : IX Congreso de Tierra en Cuenca de Campos. Fundación General de la Univesidad de Valladolid, 2012. ISBN: 978-84-616-3485-9.
22. **L, Rincón., y otros.** *Experimental rammed earth prototypes in Mediterranean climate*. Valencia : Earthen Architecture: Past, present and future, 2014.
23. **Navarro, A., y otros.** *Revestimiento de fibras vegetales en sistemas de aislamiento de tapia*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
24. **Serrano, S., Gracia, A. y Cabeza, L.F.** *Adaptation of rammed earth to modern construcion system: Comparative study of thermal behavior under summer conditions*. s.l. : Applied Energy, 2016. págs. 180-188.

25. **Serrano, S., y otros.** *Stabilized rammed earth incorporating PCM: Optimization and improvement of thermal properties and Life Cycle Assessment*. s.l. : Energy Procedia, 2012. págs. 461-470.
26. **Atelier TERRA.** Terra Awards. [En línea] [Citado el: 30 de 07 de 2016.] <http://terra-award.org>.
27. **Blondet, M. y Serrano, M.** *Capacitación en construcción sismoresistente con adobe*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
28. **Torrealva, D. y Vicente, E.** *Traditional seismic retrofitting techniques*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
29. **Blondet, M., y otros.** *A preliminary proposal for a procedure to design a rope mesh reinforcement system for adobe buildings located in seismic area*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
30. **Luna, José Luís.** Joseluisluna una visión de Sahagún. [En línea] [Citado el: 22 de 05 de 2016.] [www.joseluisluna.com](http://www.joseluisluna.com).
31. **González, B., Navarro Ezquerro, A. y Rincón, L.** *Correlación de NDT versus resistencia a compresión en tapia*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
32. **García Martínez, A. y Paredes, A.** *La casa tradicional asturiana*. Oviedo : Cajastur Editorial, 2006.
33. **Bestraten Castells, S. y Hormias Laperal, E.** *Structural criteria for the restoration of rammed earth buildings in Barcelona province (Spain)*. Valencia : In Rammed Earth Conservation - Proceeding of the 1st International Conference on Rammed Earth Conservation, RESTAPIA, 2012. págs. 269-275.
34. **Miccoli, L., Müller, U. y Fontana, P.** *Mechanical behavior of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob*. s.l. : Construction and Building Materials, 2014. págs. 327-339.
35. **Arias arquitectos.** Surtierra Arquitectura. [En línea] [Citado el: 09 de 08 de 2016.] <http://www.surtierraarquitectura.cl>.
36. **Vargas-Neumann, J. y Kevin Gil, Z.** *Normas de tierra: Ensayos de tracción indirecta*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.

37. **Maniatidis, V. y Walker, P.** *Structural Capacity of Rammed Earth in Compression*. s.l. : Journal of Materials in Civil Engineering, 2008. págs. 230-238.
38. **Tripura, D. y Singh, K. D.** *Axial load-capacity of rectangular cement stabilized rammed earth column*. s.l. : Engineering Structures, 2015. págs. 402-412.
39. **Guerrero Baca, L.F., Roux Gutiérrez, R.S. y Soria López, F.J.** *Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México*. s.l. : Palapa, 2010. págs. 45-57.
40. **Kraus, C., Hirmas, D. y Roberts, J.** *Compressive strength of blood stabilized earthen architecture*. Valencia : Earthen Architecture: Past, present and future, 2014.
41. **Tectónica.** Tectonicablog. [En línea] [Citado el: 20 de 09 de 2016.] [www.tectonicablog.com](http://www.tectonicablog.com).
42. **Allepuz, Luis y Poza, Cristian.** *Informe de las propiedades físicas y mecánicas de la casa S-LOW*. Departamento de materiales EPSEB. Barcelona : TFG, UPC, 2013.
43. **Simão Peixoto, M.V., Penido de Rezende, M.A. y Cruz Souza, L.A.** *El empleo del ultrasonido en tapia de tierra apisonada*. Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.
44. **Ciancio, D., Beckett, C.T.S. y Carrasco, J.A.H.** *Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth*. s.l. : Construction and Building Materials, 2014. págs. 59-65.
45. **Font, Fermín y Hidalgo, Pere.** *El Tapial: una tècnica constructiva mil·lenària*. Castelló : s.n., 1991.
46. **Brumaud, C., Richner, L. y Hambert, G.** *Rammed earth materials: Concrete or not concrete?* Lyon : XII Congrès mondial sur les architectures de terre, 2016.

**Documentos de soporte normativo:**

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1977) *UNE 7-368-77: Determinación con agua oxigenada del contenido de materia orgánica en los suelos*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1993) *UNE 103-104-93: Determinación del límite plástico de un suelo*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1994) *UNE 103-103-94: Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1994) *UNE 103-500-94: Ensayo de compactación. Proctor normal*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1995) *UNE 103-300:1993: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (2006) *UNE 103-205:2006: Determinación del contenido de sales solubles de un suelo*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (2006) *UNE 103-101:1995: Análisis granulométrico de suelos por tamizado*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

España. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (2006) *UNE 103-400:1993: Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).





## **11. AGRADECIMIENTOS**

---



Quisiera dar las gracias a todas aquellas personas que han participado, directa o indirectamente, en la realización de este proyecto:

- Joan Ramon Rosell Amigó y Antonia Navarro Ezquerro, tutores del proyecto, no sólo por la gran ayuda que me han prestado durante el desarrollo de los trabajos y la interpretación de los resultados; sino por dejarse "engañar", en particular Joan Ramon Rosell, por una alumna para codirigir un estudio como éste. El año 2016 no empezó con muy buen pie, nunca mejor dicho, pero a pesar de los tropiezos, las dificultades y los problemas familiares ellos han hecho todo lo posible, y lo imposible también, para guiarme durante los 8 meses que he necesitado para acabar el trabajo.
- A todo el personal del Laboratori de Materials de l'EPSEB pero muy especialmente a Marc Tous, por ayudarme a preparar los equipos, verificar el funcionamiento de los mismos y aconsejarme sobre cuál es la mejor opción para realizar algunos ensayos; y a los MVP de los becarios, Rubén Mancebo ( alias Dr. Mancebo) y Cristopher Figueroa (alias Frederick), por facilitarme el trabajo de laboratorio.
- Al Laboratori de Camins y en especial a Tomàs García por cedernos el aparataje relativo al ensayo de Proctor Normal, molde metálico con corona y maza para compactación manual.
- Laia Haurie, como coordinadora del Máster, por preocuparse y ofrecerse voluntaria en ayudar en todo lo que pudiera cuando la parte experimental se estancó.
- Joaquín Montón por ceder sus cúpulas de experimentación, donde se estaban ensayando de piezas de parquet, durante los meses que duró la campaña experimental, y también a la Lupita por prestar las suyas.
- Alejandro Tomás, por tomarse la molestia de leerse el trabajo y "seguir sin comprármelo".
- A mi familia, amigos, compañeros de clase y/o trabajo, por seguir siendo tan pesada y monotemática con "esto de la tierra".